

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERU

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA



BORRADOR DE TESIS

**OPTIMIZACIÓN DE LA TÉCNICA DEL RIEGO PASIVO PARA
EL CONTROL DE LOS EFECTOS DE LAS HELADAS POR
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

RAMIREZ CHAVEZ, Diego Renzo

HUANCAYO-PERU

2018

ASESORES

Asesor: Dr. Wilder Eufrazio Arias

Co-Asesor: Ph. D. Yamina Silva Vidal

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres que son el impulso necesario para seguir adelante, a mis hermanos por su apoyo incondicional brindado, les estoy muy agradecidos.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme una hermosa familia que es mi motor para seguir adelante.

Agradezco al proyecto “Estudio de los procesos físicos que controlan los flujos superficiales de energía y agua para el modelado de heladas, lluvias intensas y evapotranspiración en la sierra central del Perú” por el financiamiento de la presente investigación, de igual forma al Instituto Geofísico del Perú por toda la ayuda brindada durante el periodo de investigación.

A la Ph. D. Yamina Silva Vidal por su asesoría y confianza puesta en mí para poder ser parte del proyecto y realizar la presente investigación. Así como a los ingenieros y licenciados del Instituto Geofísico del Perú por su ayuda incondicional, a Lucy Giráldez, Luis Suarez, Stephany Callañaupa, Miguel Saavedra, Jairo por sus consejos y ayuda técnica para el presente estudio.

A los señores de mantenimiento y a todo el personal del IGP por facilidades brindadas para la correspondiente experimentación.

Al Dr. Wilder Eufrazio Arias, por su ayuda y consejos que guiaron la presente investigación.

A los ingenieros de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú por la formación profesional brindada.

RESUMEN

La presente investigación lleva por título “Optimización de la técnica del riego pasivo para el control de los efectos de las heladas por modelamiento y simulación”, que tiene como objetivo principal determinar la altura de agua que se debe aplicar a la técnica mencionada para poder alcanzar un incremento óptimo de la temperatura mínima de superficie.

Para cumplir con el objetivo planteado se realizó 6 experimentaciones en una parcela experimental ubicada en el Observatorio del Huayao que pertenece al Instituto Geofísico del Perú, de igual forma se elaboró un modelo matemático realizado a partir del balance energético en la superficie de la tierra seguido de su validación experimental el cual se realizó utilizando datos de los días de meses típicos en el que hubo mayor frecuencia de heladas en el año 2016. De igual forma se determinó el comportamiento de los incrementos del contenido volumétrico de agua en el suelo con diferentes valores de altura de agua aplicada en la técnica del riego pasivo para determinar el comportamiento que se presenta.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que el modelo tiene una buena estimación de la temperatura de superficie y que a partir este, el valor óptimo de la altura de agua que se debe aplicar a la técnica del riego pasivo es de 25 mm el cual permite obtener un incremento de la temperatura mínima de superficie de 2.23°C. De haber sido aplicados para los días que se presentaron fenómenos de heladas en el año 2016 entre los meses de junio-agosto se pudieron haber mitigado los efectos de las heladas para 27 de los 56 fenómenos que se registraron.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las técnicas simulación computacional alcanzaron un gran nivel de aceptación en la comunidad científica, lo que ha provocado que su uso se haya extendido a diversos campos de la ciencia aplicadas. Uno de ellos es la termodinámica que estudia las leyes físicas y los flujos de energía involucrados en los procesos atmosféricos, cuya simulación nos puede ser de utilidad no solo para describir o predecir sino para prevenir los daños de diversos fenómenos ambientales.

Los procesos de transferencia de energía en la atmósfera han sido estudiados en las últimas décadas a nivel internacional. En nuestro país y específicamente en nuestra región existen escasos estudios dedicados a este tema que en realidad son muy importantes, porque permiten comprender los procesos que rigen el microclima local con el posible fin de modelarlo, simularlo y aplicarlos en la solución de problemas referidos a este.

El problema meteorológico de mayor daño y de mayor frecuencia en el Valle del Mantaro es el fenómeno de la helada, que a pesar de ser un fenómeno muy evidente y conocido, es poca la información que se tiene sobre la protección de cultivos contra este fenómeno; Ventskevich (1958, p. 76) nos ayudan a definir el fenómeno de helada como “Cuando la temperatura de la superficie cae por debajo de 0°C” y también Cunha (1952, p. 80) como “La existencia de una temperatura baja del aire que causa el daño o muerte de las plantas, sin mencionar la formación de hielos”.

Una de las técnicas de mitigación de efectos de las heladas que se usa actualmente en la región es la técnica del riego pasivo que cuenta con muy poco estudio y más conocimiento empírico que aplican los campesinos. La FAO (2017) (Food and Agriculture Organization of the United Nations) la define como “Humedecer los suelos secos con antelación a la helada, de forma que el sol pueda calentarlo y así poder mitigar los efectos de las heladas”.

El presente informe se divide en tres capítulos. El primero de ellos se basa en la revisión bibliográfica que contiene los antecedentes nacionales e internacionales de la investigación así como bases teóricas que fundamentan el tema. El segundo capítulo se presenta la parte experimental: Materiales, equipos, procedimiento, límites y el diseño de la investigación. En el tercer capítulo se presentan el tratamiento de datos y discusión de resultados y finalmente se presentan las conclusiones recomendaciones y anexos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar la altura de agua que se debe aplicar a la técnica del riego pasivo para alcanzar un incremento óptimo de la temperatura mínima de superficie.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desarrollar y validar un modelo matemático que describa la temperatura de superficie en un horario nocturno para el tipo de textura de suelo predominante en el Valle del Mantaro.
- Determinar la profundidad del contenido volumétrico de agua en el suelo que tenga un mejor comportamiento entre los datos simulados y observados.
- Determinar el comportamiento de los incrementos del contenido volumétrico de agua en el suelo en función a diferentes alturas de agua aplicada en la técnica del riego pasivo.

SIMBOLOGIA UTILIZADA.

T_a	Temperatura ambiente, K
T_s	Temperatura de superficie, K
ρ_{air}	Densidad del aire, $\frac{kg}{m^3}$
ρ_{soil}	Densidad del suelo, $\frac{kg}{m^3}$
C	Capacidad calorífica, $\frac{J}{K}$
P	Presión atmosférica, Pa
La	Calor latente de vaporización del agua, $\frac{W}{m^2}$
k	Conductividad térmica, $\frac{W}{m.K}$
T_z	Temperatura a profundidad z , K
e_o	Presión de vapor del agua, Pa
e_a	Presión de vapor del aire, Pa
ΔE	Variación de energía térmica, $\frac{W}{m^2}$
\dot{m}	Flujo másico, $\frac{kg}{s}$
C_p	Capacidad específica, $\frac{J}{kg.K}$
$\frac{\partial T}{\partial y}$	Gradiente de temperatura en dirección del flujo de calor, $\frac{K}{m}$
∇T	Operador de gradiente de temperatura, K
G_s	Irradiación solar, $\frac{W}{m^2}$
σ	Constante de Boltzmann, $\frac{W}{m^2.K^4}$
$E_{b\lambda}(\lambda, T)$	Radiancia espectral, $\frac{W}{m^2.\mu m}$
λ	Longitud de onda de radiación emitida, m
P_M	Poder máximo de emisión a Temperatura Constante, $\mu m.K$
$E_b(T)$	Intensidad de radiación de Boltzmann, $\frac{W}{m^2}$
δ	Reflectividad, Adimensional
α	Absortividad, Adimensional
E_{ref}	Energía reflejada por el material, $\frac{W}{m^2}$

E_{emi}	Energía reflejada por el material, $\frac{W}{m^2}$
E_{abs}	Energía absorbida por el material, $\frac{W}{m^2}$
h	Coefficiente convectivo de transferencia de energía, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
A_h	Área de transferencia convectiva de la superficie, m^2
Re	Número de Reynolds, Adimensional
μ	Viscosidad cinemática del fluido, $\frac{m^2}{s}$
Nu	Número de Nusselts, Adimensional
Pr	Número de Prandtl, Adimensional
L	Longitud característica de área experimental, m
γ	Albedo del suelo, adimensional
MEF	Eficiencia de modelado
CD	Coefficiente de determinación del modelo
C	Coefficiente de error
r	Coefficiente de Pearson
\hat{y}_i	i-ésimo valor predicho por la recta de regresión ajustada.
y_i	Valor i-ésimo observado
z_i	Valor i-ésimo valor predicho por el modelo
y	Media Aritmética de las observaciones
n	Número de datos
v	Velocidad del viento, $\frac{m}{s}$
VWC	Contenido volumétrico de agua en el suelo, %

INDICE DE CONTENIDO

ASESORES	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVOS	7
SIMBOLOGIA UTILIZADA.	8
INDICE DE CONTENIDO	10
INDICE DE TABLAS	13
INDICE DE FIGURAS	14

CAPITULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Antecedentes del problema	16
1.2. Bases teóricas	21
1.2.1. Heladas	21
1.2.1.1. Factores intervinientes en la formación de procesos de heladas	24
1.2.1.2. Efectos de las heladas en el Valle del Mantaro	27
1.2.2. Técnicas de protección contra efectos de heladas	29
1.2.3. Técnica del riego pasivo	33
1.2.4. Primera ley de la termodinámica	36
1.2.5. Mecanismos de transferencia de energía	37
1.2.5.1. Conducción	37
1.2.5.1.1. Conductividad térmica	39
1.2.5.1.2. Capacidad calorífica	39
1.2.5.1.3. Difusividad térmica	40
1.2.5.2. Radiación	41
1.2.5.2.1. Ley de Planck	41
1.2.5.2.2. Ley de desplazamiento de Wien	42
1.2.5.2.3. Ley de Steffan Boltzman	42
1.2.5.2.4. Propiedades de radiación	43
1.2.5.3. Convección	45

1.2.6. Albedo	48
1.2.7. Tipo de suelo	50
1.2.8. Modelo matemático	51
1.2.9. Simulación	54
1.2.10. Optimización	55
1.2.11. Control	56
1.2.12. Validación de modelo matemático	56
1.2.13. Modelo matemático propuesto	57
1.2.14. Instrumentos de medición	63
1.3. Marco conceptual	63

CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Materiales	65
2.2. Equipos e instrumentos	65
2.3. Procedimiento	65
2.4. Límites de la investigación	66
2.5. Población y muestra	67
2.6. Técnica de procesamiento y análisis de datos	67
2.7. Diseño de la investigación	67

CAPITULO III

TRATAMIENTO DE DATOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Presentación de mediciones	70
3.2. Validación de modelo elaborado	75
3.3. Resultados	83
3.4. Proceso de la prueba de hipótesis	89
3.5. Discusión de resultados	91

CONCLUSIONES.	93
----------------------	-----------

RECOMENDACIONES.	94
-------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA	95
---------------------	-----------

ANEXOS.	99
----------------	-----------

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores intervinientes en la formación de heladas.	25
Tabla 2. Principales factores intervinientes en la formación de heladas.	26
Tabla 3. Temperaturas críticas para diferentes cultivos.	27
Tabla 4. Diferencia entre técnicas de protección activa y pasiva contra efectos de las heladas.	31
Tabla 5. Tipos de métodos de protección contra heladas, pasivos y activos	31
Tabla 6. Valores de conductividad térmica en distintos materiales.	39
Tabla 7. Valores de capacidad calorífica en distintos materiales.	40
Tabla 8. Valores de capacidad calorífica en distintos materiales	41
Tabla 9. Valores típicos de albedo en diferentes cubiertas	49
Tabla 10. Tipo de textura de suelo en diferentes distritos de la Provincia de Chupaca.	51
Tabla 11. Tipos de modelos matemáticos	53
Tabla 12. Diseño experimental de la experimentación	68
Tabla 13. Comportamiento de Propiedades térmicas del suelo en función al contenido volumétrico de agua en el suelo.	75
Tabla 14. Validación de modelo elaborado para días del periodo junio-agosto de 2016.	81
Tabla 15. Perfil de VWC en el suelo para el día 19/07/2016	83
Tabla 16. Incrementos de contenido volumétrico de agua en el suelo para las diferentes fechas de experimentación.	85
Tabla 17. Pruebas de normalidad respecto al modelo matemático de estado estacionario	90
Tabla 18. Prueba de homogeneidad de varianza respecto al modelo matemático	90
Tabla 19. Prueba de muestras independientes respecto al modelo matemático de estado estacionario.	91

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución del porcentaje de heladas para el periodo 1958-2008.	22
Figura 2. Frecuencia de Heladas por Año periodo: 1921-2016.	23
Figura 3. Frecuencia de heladas en periodos cuatrimestrales, años 1921-2016	23
Figura 4. Frecuencia de heladas por estaciones climáticas, años 1921-2016.	24
Figura 5. Valor económico de cultivos afectados por el fenómeno de las heladas en la provincia de Chupaca en periodo 2004-2017.	29
Figura 6. Efectos de las heladas en cultivos del Valle del Mantaro, julio de 2016.	30
Figura 7. Diferencia de color entre suelos izquierda:Suelo seco, derecha:Suelo húmedad	34
Figura 8. Propiedades térmicas típicas de suelos arenosos, arcillosos y turbas.	35
Figura 9. Relación entre absorptividad y reflectividad.	44
Figura 10. Diferencia entre convección forzada (Izquierda) y natural (Derecha).	46
Figura 11. Comportamiento del albedo en función a la humedad del suelo.	49
Figura 12. Estructuración para análisis de procesos físicos.	52
Figura 13. Metodología de desarrollo de un modelo matemático.	55
Figura 14. Etapas de optimización de un proceso.	55
Figura 15. Flujo de calor de entrada y salida a un elemento diferencial.	58
Figura 16. Caracterización de los límites de la parcela experimental, para observar condiciones de frontera.	59
Figura 17. Balance energético ideal sobre la superficie del suelo	60
Figura 18. Representación de la malla en dominio discretizado	62
Figura 19. Límites de la investigación.	67
Figura 20. Comportamiento de variables meteorológicas medidas, a) Radiación de Onda larga, b) Radiación de Onda corta, c) Temperatura ambiente, d) Velocidad de viento.	70
Figura 21. Comportamiento del contenido volumétrico de agua en el suelo, primer experimento - 05/06/2017 de 00:00 h a 23:59 h.	71
Figura 22. Comportamiento de variables meteorológicas medidas, a) Radiación de Onda larga, b) Radiación de Onda corta, c) Temperatura ambiente, d) Velocidad de viento.	72
Figura 23. Comportamiento del contenido volumétrico de agua en el suelo, Segundo experimento- 13/06/2017 de 00:00 h a 23:59 h.	73

Figura 24. Comportamiento del contenido volumétrico de agua en el suelo en los experimentos 3er, 4to, 5to y 6to, realizados en el contexto de la presente investigación. Fuente: Elaboración Propia	74
Figura 25. Comportamiento gráfico de las propiedades térmicas del suelo en función al contenido volumétrico de agua.	76
Figura 26. Comportamiento del albedo en función al contenido de agua en el suelo.	77
Figura 27. Comportamiento del perfil de temperaturas en el suelo en día típico de helada 06/06/2017 para rango de 2 – 50 cm de profundidad.	78
Figura 28. Temperaturas mínimas de superficie a nivel diario en periodo de junio – agosto de 2016.	79
Figura 29. a) Comparación entre datos observados y simulados de la temperatura de superficie para el periodo 19/06-20/06 de 2016, b) Diagrama de dispersión de datos simulados y observados para el periodo 19/06-20/06 de 2016.	80
Figura 30. Comportamiento de las salidas del modelo frente a variaciones de contenido volumétrico de agua en el suelo.	84
Figura 31. Comportamiento gráfico de los incrementos del contenido volumétrico de agua (VWC) en el suelo frente a diferentes alturas de agua usadas.	86
Figura 32. Regresión polinómica de 4to orden aplicada a los incrementos de contenido volumétrico de agua (VWC) en el suelo con diferentes alturas de agua.	87
Figura 33. Diferentes comportamientos de la temperatura de superficie a distintos valores de altura de agua usados en la técnica del riego pasivo, usando el modelo elaborado.	88
Figura 34. Comportamiento de la temperatura mínima de superficie a diferentes valores de la altura de agua usados en la técnica del riego pasivo, utilizando el modelo elaborado.	89

CAPITULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Antecedentes del problema

En las últimas décadas, a nivel internacional se empezó a realizar investigaciones referidos a balances energéticos aplicados a temas atmosféricos, dentro de ellos uno de los que tiene muy pocos estudios son las técnicas de protección contra los efectos de las heladas y de igual forma sobre su optimización.

Lhome (2003) realizó una investigación titulada “Mitigación de las heladas en los camellones del altiplano andino”, el cual tuvo como objetivo estudiar y optimizar los sistemas de camellones del altiplano para poder mitigar los efectos de las heladas que son muy frecuentes en esa región. Se observó una temperatura de cultivo (Temperatura a 10 cm sobre superficie) siempre mayor en el sistema de camellones que en una parcela control que se encontraba a 2 km de distancia con condiciones similares. Se llegó a la conclusión de que el sistema de camellones ayuda a la mitigación de los efectos de las heladas. Adicionalmente realizó un modelo mecánico con el fin de observar el comportamiento de los flujos de energía en un periodo nocturno así como simular la temperatura de cultivo durante dicho periodo. Como parte final de la investigación se usó el modelo de forma predictiva para observar la influencia que ejercía la geometría de los camellones sobre la temperatura de cultivo y así poder establecer los parámetros necesarios para optimizar la técnica de los camellones. Esta investigación es importante por la metodología que se usa ya que evalúa y optimiza la técnica de mitigación de los efectos de las heladas utilizando la simulación con una importante herramienta.

Por otra parte Saavedra (2010) desarrolló su investigación titulada “Caracterización física de heladas radiativas en el Valle del Mantaro” un trabajo desarrollado en el Observatorio del Huayao cuyo objetivo fue caracterizar las heladas radiativas que tienen ocurrencia en el Valle del Mantaro mediante el análisis de datos observados y registrados con estaciones meteorológicas y datos de satélite. Adicionalmente desarrolló un modelo numérico de difusión de calor y realizó un análisis de sensibilidad de la temperatura mínima de superficie frente a diferentes factores: Radiación de onda larga, humedad, emisividad, temperatura inicial, etc. Llegó a la conclusión que las variables que más influyen en la temperatura mínima es el contenido volumétrico de agua en el suelo y la cantidad de

radiación infrarroja incidente y también que el modelo elaborado simula con buena aproximación durante los meses de mayor frecuencia de heladas.

El año 2017 (Galdos, 2017) realizó la investigación “Variación estacional de la radiación infrarroja, humedad del suelo y su efecto sobre la temperatura mínima superficial en el Observatorio de Huancayo, Junín-Perú” que tuvo como objetivo principal analizar el efecto de la radiación infrarroja atmosférica y la humedad del suelo sobre la temperatura mínima superficial usando datos observados y un modelo numérico de difusión desarrollado por Saavedra (2010). Este modelo fue desarrollado a través de un balance energético en la superficie del suelo, con el cual se analizó la temperatura de superficie por estaciones llegando a la conclusión que el modelo estima con buena aproximación la temperatura superficial mínima en la mayoría de eventos nocturnos durante invierno cuando la conductividad y capacidad térmica corresponden a valores de humedad del suelo entre 0% y 10%.

A nivel internacional se encuentran interesantes investigaciones como la realizada por Abshaev & Malkarov (2009) en la república de Balkar, Rusia titulada “Optimization of parameters of an artificial aerosol layer for radiation frost protection” (“Optimización de los parámetros de una capa de aerosol artificial para la protección contra las heladas por radiación”) en donde el objetivo fue establecer los parámetros óptimos en la técnica de producción de capas de humos y nieblas artificiales para poder formar un efecto invernadero cuyo fin es crear una atmósfera artificial encima de la cosecha el cual evita parcialmente el enfriamiento del suelo por radiación. En la investigación realizaron un estudio de difusión y transporte de aerosoles con el cual concluyeron que para generar un efecto invernadero óptimo que pueda mitigar los efectos de las heladas, es necesario una capa de aerosol con una concentración $N \geq 1.77 \times 10^{11} \text{ m}^{-2}$ de las partículas con 1.5 a 2 μm de radio. Cabe resaltar que realizaron simulaciones en modelos elaborados por otros autores, los cuales sirvieron en el desarrollo de su investigación.

Norton (2008) en su investigación “Sprinkler frost protection”, realizó una investigación para determinar los parámetros de diseño óptimos de sus productos con el fin de usarse en la mitigación de efectos de las heladas en cultivos de fresas. Concluyeron que se necesitan rociadores que apliquen un mínimo de $0.1 \frac{\text{pulg}}{\text{hora}}$ de agua en los cultivos, los rociadores deben girar como mínimo a 1 revolución por minuto y que la presión de operación

debe estar en el rango de 45-60 psi. Con estos parámetros se optimizó la técnica del riego por aspersión para elevar la temperatura de cultivo en una siembra de fresas.

En la República de China, Pingping, Wenye, & Yongguang (2015) realizaron su investigación titulada “Optimal design of wind machine impeller for frost protection based on CFD and its field test on airflow disturbance” (“Diseño óptimo del impulsor de la máquina de viento para protección contra heladas basado en CFD y su prueba de campo sobre perturbación del flujo de aire”) que tuvo como objetivo principal diseñar un impulsor para máquinas de viento que se usan en la protección contra los efectos de las heladas basándose en ingeniería inversa y simulación CFD. Para obtener un diseño óptimo recurrieron a una simulación del rendimiento aerodinámico del impulsor y a evaluaciones en campo del comportamiento de flujo de aire. Es así como determinaron los parámetros óptimos del impulsor como los ángulos de instalación, de barrido, el número de cuchillas. Este diseño fue comparado con máquinas de viento comerciales demostrando una eficiencia de 71.7% más alta en la protección contra los efectos de las heladas.

Wullschleger, Cahoon, Ferguson, & Oosterhuis (1991) desarrollaron “SURFTEMP” que es la simulación del modelo elaborado en el contexto de su investigación “*SURFTEMP: Simulation of soil surface temperature using the energy balance equation.*” (“*SURFTEMP: Simulación de la temperatura de superficie de suelo usando la ecuación de balance de energía.*”), el cual tuvo fines netamente académicos. El modelo desarrollado incluye variables como radiación neta, flujo de calor sensible, flujo de calor Latente. La salida del modelo son los flujos de calor de suelo, sensible y latente, para un día completo, 00:00h – 23:59h. Como parte importante en esta investigación se hace una aplicación del modelo en un caso de riego, haciendo la comparación de las salidas entre un suelo mojado con 10mm de agua y un suelo seco en donde se observa las diferencias horarias de los flujos de energía calculados. De la investigación se concluyó que el modelo simula eficazmente los flujos de energía y que esta es una gran herramienta para observar las influencias de los parámetros geográficos, climáticos y edáficos en la temperatura de superficie.

De igual forma en México Gonzales & Hill (1997) desarrollaron un modelo en el contexto de la investigación titulada “PASTMOD, un modelo para simular la temperatura de suelo, crecimiento de pastos y balance de agua en el suelo”. Aunque no se explica detalladamente en el artículo publicado, el objetivo fue desarrollar un modelo que ayude a entender de forma temporal el crecimiento de pastos con la influencia de la temperatura de

superficie y un balance hídrico realizado, es así como se desarrolló PASTMOD (Pasture Modeling) el cual consiste en la simulación con diferentes salidas de un sistema que engloba la temperatura de superficie, la tasa de crecimiento de pastos y el balance hídrico en la superficie del suelo. La simulación se realiza por separado para después relacionarlos y dar las salidas esperadas, los parámetros de entrada son: Temperatura máxima y mínima de aire, humedad relativa máxima y mínima, precipitación o irrigación en el suelo, parámetros de cultivos como longitud de raíz, índice de área foliar, etc. Para realizar la investigación se colocaron sensores de temperatura a diferentes de profundidades del suelo (3, 10 y 30cm), se midió la conductancia del suelo, energía, humedad relativa y temperatura del aire.

A inicios de 1970 Hasfurther & Burman (1973) realizó su investigación titulada “Soil temperature modeling using air temperature as a driving mechanism”(“Modelado de temperatura de suelo usando la temperatura de aire como un mecanismo de accionamiento.”) al igual que anteriores antecedentes mencionados, en esta investigación tuvo como objetivo elaborar un modelo que describa la temperatura de superficie, pero sin utilizar los flujo energéticos, velocidad de viento o parámetros agronómicos (Índice de área foliar, tipo de cultivo, etc.), solo se usó el perfil de temperatura del suelo (1,4 y 8 pulgadas), la constante de difusividad térmica junto con la temperatura de aire promedio. Se resalta que este modelo puede llegar a predecir solo la media de temperaturas a 1 pulgada de profundidad a largo de un día es por eso que este modelo se usa para grandes periodos. La forma de modelamiento incluye transformadas de Fourier y la ecuación unidimensional de difusión de energía. Se concluyó que la desviación entre lo simulado y lo observado es de un máximo de 3°C a 1 pulgada de profundidad, en cambio para una mayor profundidad existe hasta 6°C de desviación lo cual, según menciona el autor, puede deberse a que a diferentes profundidades las propiedades térmicas varían.

La Universidad de California realizó una interesante investigación. Luo, Loomis, & Hsiao (1992) elaboraron un modelo tomando en cuenta procesos físicos con salidas de temperatura de superficie, temperatura ambiente y humedad relativa del suelo; el modelado se realizó con un cultivo tomando en cuenta todas las influencias que este pueda ejercer sobre los procesos físicos. Este estudio fue titulado como “Simulation of soil temperatura crops” y uno de sus objetivos es ayudar a entender procesos como al dinámica de la raíz, actividad de los microbios del suelo y la disponibilidad de nutrientes en el suelo. En el estudio se estiman flujos de energía como calor latente y sensible, el albedo en función al

contenido de agua en el suelo. Otro objetivo fue realizar un balance de energía para poder calcular el valor de la temperatura de superficie (T_o), en el modelo se fue integrando diferentes relaciones encontradas por otros autores, haciendo parcialmente predictivo el modelo. El intervalo de tiempo para toma de muestras fue de 1 hora realizada durante todo el día. La validación se realizó con un análisis de sensibilidad y comparación con datos recogidos de mediciones de campo. Se concluyó que el modelo es muy eficiente y que puede ser de uso extendido tan solo adaptando los parámetros propios del lugar en donde se quiere aplicar.

En otro contexto Idso, Aase, & Jackson (1975) realizó un estudio que tenía como objetivo determinar relaciones entre el flujo de radiación neta y el flujo de calor del suelo para un suelo franco arcilloso y también determinar la influencia del albedo de la superficie del suelo en estos 2 flujos. La investigación se realizó con un suelo desnudo (Sin cultivo) con diferentes fechas que coincidían con las estaciones en el año 1973. Para realizar las mediciones se utilizaron principalmente piranómetros para radiación incidente y reflejada y un plato de flujo de calor instalada a 2 cm bajo superficie, las medidas del contenido de agua en el suelo fueron determinadas por un método gravimétrico. Realizaron regresiones lineales del flujo de radiación neta vs flujo de calor del suelo días después de haber aplicado una irrigación de agua de 10cm, en ellos se observa que la relación entre el flujo de calor del suelo con el flujo de radiación neta aumenta según el suelo se va secando, también midió la variación horaria del contenido volumétrico del agua en el suelo el día posterior a una irrigación de 10 cm de agua. Como parte principal midieron el albedo y lo graficaron con los flujos de energía para diferentes meses. De la investigación se concluye que para un mayor flujo de radiación neta el albedo disminuye, es decir tienen una relación inversa, sucediendo lo contrario con el flujo de calor del suelo el cual se comporta de manera directa con el albedo de la superficie del suelo. El resultado tal vez más importante para la presente investigación son las mediciones diurnas del albedo con la media del contenido de agua en el suelo de 0-2cm de que se usará y presentara en los posteriores capítulos.

El mismo autor prosiguió con la investigación determinando la dependencia del albedo de un suelo desnudo en el contenido de agua del suelo en su investigación titulada “The dependence of bare soil albedo on soil water content” (“La dependencia del albedo del suelo desnudo en el contenido de agua del suelo”). En este estudio el objetivo era observar el comportamiento del albedo para diferentes meses y condiciones. Las observaciones son

días posteriores de realizar un riego de 10 cm de altura de agua, en el cual se observa cómo se comporta el suelo mojado hasta llegar a un suelo seco y el cambio de color del suelo, de oscuro a más claro. De igual forma miden el albedo y lo comparan con el contenido volumétrico de agua en el suelo, esto lo realizan a diferentes profundidades entre 0 a 10 cm. Se concluyó el valor de albedo aumenta con la profundidad y que al aumentar el contenido de agua en el suelo, el albedo aumenta por estar ligado con el color del suelo y por ende su absorptividad.

Otra parte fundamental para la investigación y del cual no se encontró mucha información es sobre la técnica del riego pasivo el cual describe Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010), pero si en diversas partes del mundo se trabajó en técnicas de mitigación de heladas, algunos planteando un modelo y con su respectiva simulación como es el caso de la investigación realizada en Inglaterra por Hamer, (1989) que se titula “Simulación de los Efectos de las Variables Ambientales sobre los Requerimientos de Agua para la Protección contra heladas por Irrigación por aspersion”. En esta investigación se planteó como objetivo elaborar un modelo que calcule en función al tiempo, la tasa de precipitación requerida en diferentes condiciones ambientales como velocidad del viento y la presión de vapor para diferentes condiciones iniciales de un capullo (esferas, cilindros o placas planas). El análisis de datos partió de aquellos que se estimaron de registros termográficos e hidrográficos del Instituto de Investigación Hortícola de East Malling. Se llegó a la conclusión de que el modelo presentado sirve para el diseño de un sistema de riego por aspersion que mitigue eficazmente los efectos de las heladas.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Heladas

Comúnmente al referirse al término “heladas” la cultura de nuestra región lo asocia con el congelamiento del agua a muy tempranas horas del día. Pero al hablar técnicamente la “helada” se define como un fenómeno meteorológico que depende de la temperatura ya sea de la superficie del suelo o del ambiente. Algunas definiciones de helada de reconocidos personajes de la comunidad científica son:

- Hogg (1950) y Lawrence (1952) definen helada como la ocurrencia de una temperatura inferior o igual a 0°C medida en una garita “Tipo Stevenson” a una altura de 1.25 a 2 m.
- Raposo (1967) y Hewett (1971) definen helada como la simple ocurrencia de una temperatura inferior a 0°C, sin definición del tipo de garita y altura.

- Para Cunha (1952) define helada como la ocurrencia de una temperatura de superficie inferior a 0°C.

En 1992 se propone una clasificación del fenómeno de las heladas por la forma de transferencia de energía predominante en cada uno de ellos. Kalma, Laughlin, & Caprio (1992) clasificaron las heladas en: “Advectivas” y “Radiativas”. Las heladas advectivas son producidas por grandes masas de aire a una temperatura comúnmente menor que 0°C, en cambio las heladas radiativas están asociados a la transferencia de energía por radiación comúnmente generado con un cielo despejado lo que permite mayor intercambio de energía con la atmósfera.

Según Trasmonte (2010) una mayor cantidad de fenómenos de heladas se registran en el Valle del Mantaro entre los meses de mayo - agosto, la frecuencia es de 2 a 16 días por cada mes con una mayor frecuencia en el mes de julio. En el periodo de enero - marzo, cuando hay mayor frecuencia de lluvias, las heladas son bastantes escasas. De igual forma realizó distribución del porcentaje de heladas ocurridas en el Huayao en un periodo anual de entre los años 1958-2008, lo descrito se muestra en la Figura 1.

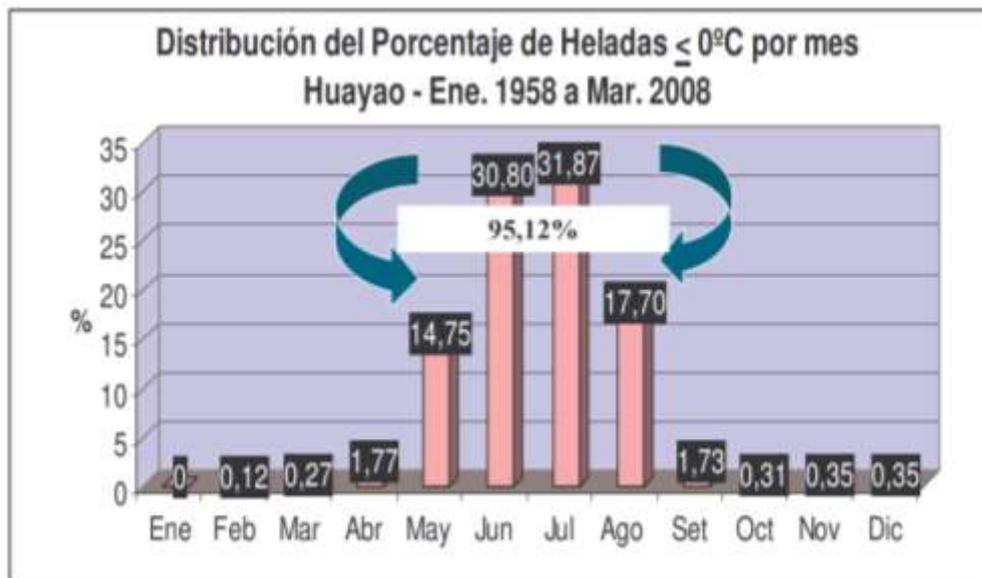


Figura 1. Distribución del porcentaje de heladas para el periodo 1958-2008.
Fuente: (Trasmonte, 2010, p. 89).

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizó un análisis de datos sobre la temperatura mínima del ambiente para el periodo de 1921-2016, como resultado se muestran las frecuencias de heladas anuales para casi un siglo de datos en la Figura 2.

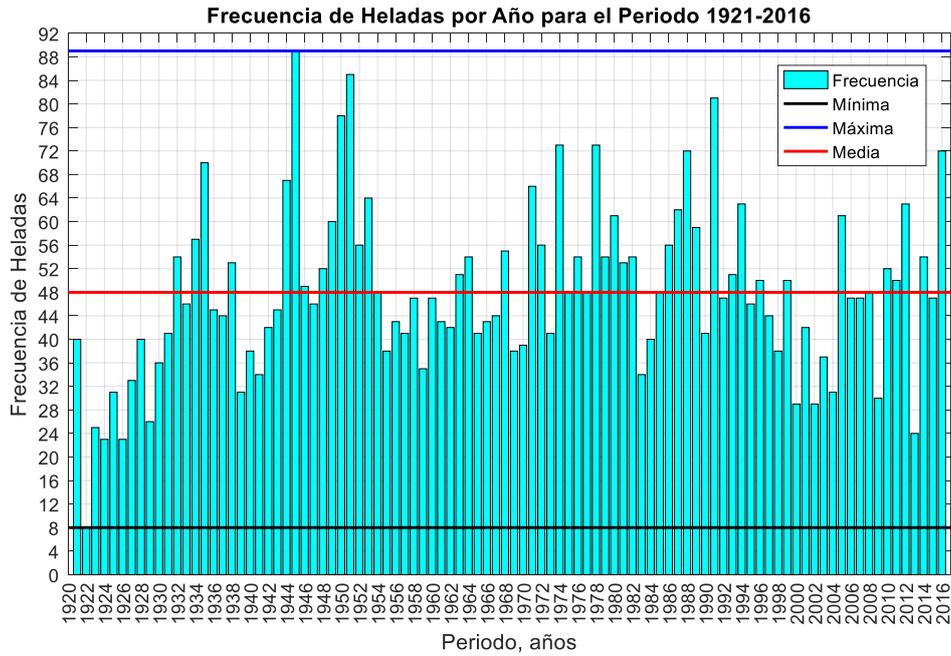


Figura 2. Frecuencia de Heladas por Año periodo: 1921-2016.

Fuente: (IGP, 2017)

Como se muestra en la Figura 2 hay una media de 48 heladas por año, una mayor frecuencia para el año de 1945 con un registro de 89 heladas y una menor frecuencia en el año 1922 tan solo con un registro de 8 heladas.

De igual forma se el IGP (2017) analizó para un periodo de 4 meses Enero-Abril, Mayo-Agosto, Setiembre-Diciembre.

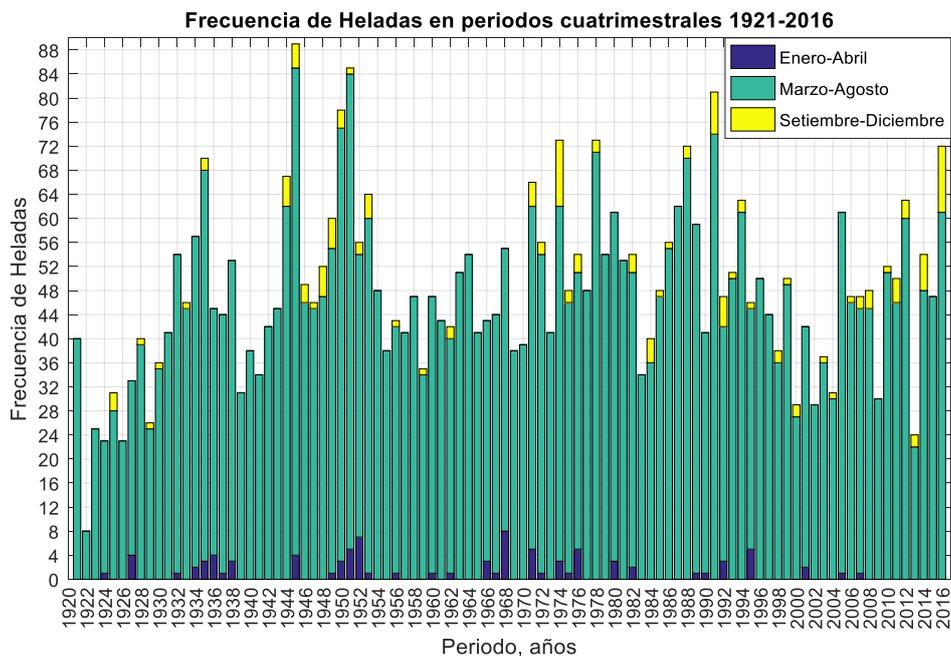


Figura 3. Frecuencia de heladas en periodos cuatrimestrales, años 1921-2016

Fuente: (IGP, 2017)

En la Figura 3 se muestra la existencia de una mayor frecuencia para los meses de mayo a agosto, con una máxima en el año de 1945 con un registro de 81 heladas para ese periodo y una mínima en 1922 con un registro de 8 heladas.

Más importante aún IGP (2017) analizó los datos para cada estación climática: verano (diciembre-febrero), otoño (marzo-mayo), invierno (Junio-Agosto), Primavera (Setiembre-Noviembre).

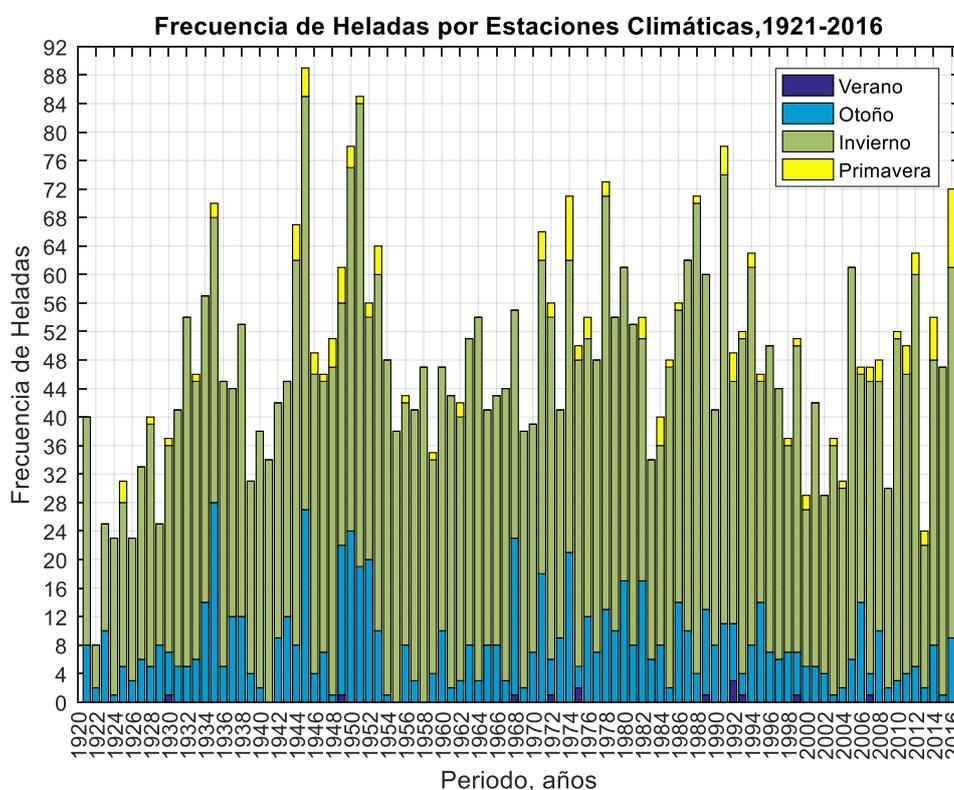


Figura 4. Frecuencia de heladas por estaciones climáticas, años 1921-2016.
Fuente: (IGP, 2017)

Observando la Figura 4, como era de esperarse, existe una mayor frecuencia de heladas en la estación climática de invierno, seguido de una mayor frecuencia en la estación de otoño, primavera y de frecuencia muy mínima en verano.

1.2.1.1. Factores intervinientes en la formación de procesos de heladas

Según la literatura existen diferentes factores que propician la formación del fenómeno de las heladas, estas pueden variar según las condiciones climáticas propias de los lugares donde se estudian, por este motivo se escogió autores que estudiaron el fenómenos de las heladas en el Valle del Mantaro.

Los factores que intervienen en la formación de heladas, su intensidad y frecuencia dependen de factores que pueden variar de una zona a otra, Transmonte & Enciso (2012)

realizaron un estudio descriptivo de fenómenos extremos en el Valle del Mantaro, entre ellos el fenómeno de las heladas y cuyos factores para su formación son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1

Factores intervinientes en la formación de heladas.

VARIABLES METEOROLOGICAS	NUBOSIDAD	Con cielos bien despejados por la noche, toda la energía terrestre se pierde libremente al espacio y de suelo se enfría rápidamente.
	VIENTO	En condiciones de débil o nulo viento, se reduce el intercambio de energía horizontal y vertical, que de presentarse podrían evitar los descensos bruscos de temperatura.
	RADIACION SOLAR	Los terrenos que reciben menos cantidad de radiación solar, son más fríos lo cual influencia en la temperatura de superficie.
RELIEVE Y TOPOGRAFIA	A altitudes mayores a 3000msnm las heladas son frecuentes, incrementándose su intensidad y frecuencia conforme aumenta la altitud. En terrenos planos y convexos de valles interandinos se produce el estancamiento de aire frío, favoreciendo la helada. Contrariamente, los terrenos inclinados presentan menor frecuencia de heladas por facilitar el desplazamiento de masas de aire frío.	
TIPO DE SUELO Y SUS COMPONENTES	Las características del suelo o su tipo, determinan en gran medida las características térmicas cerca de su superficie, tanto durante la noche como a cualquier hora del día. Un suelo arenoso seco transfiere mejor el calor que uno arcilloso y ambos transfieren y guardan mejor el calor que el suelo orgánico. En suelos húmedos, el calor del día es retenido a mayores profundidades y por la noche el calor se pierde lentamente, dando una característica de abrigo. Los componentes inorgánicos como el potasio adicionado al suelo, aumentan la tolerancia a heladas por sus efectos termorreguladores.	

Fuente: Adaptado de (Transmonte, 2012, p. 93)

Por otra parte según el SENAMHI-FAO (2010) en su publicación “Atlas de heladas” que se realizó en convenio de cooperación técnica inter-institucional SENAMHI-FAO, los

principales factores que propician la ocurrencia de los fenómenos de las heladas son mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2

Principales factores intervinientes en la formación de heladas.

ACTORES MACRO-CLIMATICOS	LATITUD Y ALTITUD	A mayor latitud y altitud hay una mayor frecuencia de heladas
	CONTINENTALIDAD Y OCEANIDAD	El océano tiene un efecto moderador en las variaciones de temperatura. En el interior del continente la variación de temperatura es mayor y por tanto mayor es el enfriamiento
	MASA DE AIRE POLAR	Las invasiones de masa de aire frío del polo sur alcanzan la región sudeste, empujados por los vientos de oeste a sudoeste traspasan la cordillera, el paso por los andes genera una masa fría y seca que favorece la pérdida de energía por radiación durante la noche. En cambio, si la masa polar penetra por el océano atlántico, esta gana humedad en su trayectoria, con vientos de dirección sur y sudoeste, esta humedad provoca una cierta tropicalización de la masa polar que ocasiona la condensación de vapor de agua, liberando su calor latente y calentándola.
FACTORES TOPO-CLIMÁTICOS	En países montañosos como el nuestro, el relieve juega un papel importante, por el efecto que tiene el drenaje de aire frío y por la exposición. Un terreno plano está sujeto a estancamiento de aire frío favoreciendo la helada; en caso el terreno sea cóncavo su forma facilita la acumulación de aire frío donde la temperatura puede ser entre 4 y 8 grados más baja que las temperaturas en las pendientes y partes altas; en caso sea terreno convexo presenta menor frecuencia de heladas por facilitar el desplazamiento de aire frío que no esté circundando por los terrenos más elevados.	
FACTORES METEOROLÓGICOS	NUBOSIDAD	El cielo despejado durante la noche permitirá que se pierda toda la radiación terrestre libremente hacia el espacio y el suelo se enfría rápidamente por falta de vapor de agua que absorba esta radiación y la irradia nuevamente hacia la superficie terrestre.
	VIENTO	Si el viento permanece en calma, se reduce la transferencia de calor por convección (Movimientos verticales de masas de aire ascendentes y descendentes) o advección (movimiento de masas de aire horizontales).
	BAJA TEMPERATURA VESPERTINA	SI la temperatura existente a la puesta del sol es alta, un descenso intenso durante la noche no sería muy dañino, pero si fuese baja, el daño causado por la disminución de temperatura puede ser severo en las primeras horas del día siguiente.

Fuente: Adaptado de (SENAMHI-FAO, 2010, p.12)

De las 2 tablas mostradas, se observa que los factores que propician la formación de heladas son en común: nubosidad, velocidad del viento y la topografía del sitio.

1.2.1.2. Efectos de las heladas en el Valle del Mantaro

Los cultivos son los que más daños reciben por fenómeno de la helada, aunque existen aquellos que son resistentes, la mayoría son sensibles a los daños por heladas. Los daños en los cultivos dependen principalmente de la especie y estado fenológico en el cual se encuentre el cultivo. De Fina (1945) y Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010) mencionan que el daño que puede producirse al cultivo va a depender de su sensibilidad frente a temperaturas bajas y el periodo al cual está expuesto al fenómeno de la helada, esta temperatura se la denomina “Temperatura crítica de daño”. Estas varían según el cultivo, SENAMHI-FAO (2010) hizo un recuento de algunas investigaciones sobre temperaturas mínimas en diferentes cultivos y la clasificaron en la Tabla 3.

Tabla 3

Temperaturas críticas para diferentes cultivos.

CULTIVO VARIEDAD	TEMPERATURA CRÍTICA, °C	
	En Hoja	En Caseta
Manzana cv. Jonathan	-2.5	1.5
Palta cv. Pollock	-1	3
Plátano cv. Guatemala	-1.1	2.9
Mango cv. Keitt	-2	2
Naranja cv. Jaffa	-3.2	0.8
Anona cv. Cherimóia	-6	-2
Anona cv. Condessa	-4	0
Goiaba	-4	0
Acerola	-4	0
Maracuyá	-5	-1
Palta cv. Geada	-4	0
Café cv. Catuai	-4	0
Café cv. Nuevo Mundo	-4	0

Fuente: Adaptado de (SENAMHI-FAO, 2010, p. 14)

Uno de los factores que intervienen en los daños por heladas es la fisiología de la planta y como esta puede reaccionar frente a las temperaturas bajas, es decir, cómo se puede adaptar frente al fenómeno de las heladas. Cuando se presenta una helada la planta tiende a adaptarse, lo cual probablemente sea por un incremento del contenido de solutos en el tejido o por la

disminución de las bacterias que se encargan de la nucleación del hielo, lo que hace que no se forme mucho hielo en la capa extracelular, mitigando parcialmente los efectos de las heladas. Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010, p. 183).

Los sistemas internos de las plantas, sus células intracelulares y extracelulares mueren al ser sometidos a periodos prolongados de aire a baja temperatura e intensa De Fina (1945, p. 258).

El proceso de muerte de las plantas debido al fenómeno de la helada empieza cuando la temperatura es tan baja que alcanza la temperatura crítica de la planta lo que produce un congelamiento del líquido extracelular de las plantas generando una perturbación en el potencial químico del agua en el líquido intracelular. Al estar en estas condiciones la planta libera agua en un intento de solucionar el problema lo cual causa la deshidratación de la planta a nivel celular, un aumento de la concentración de solutos y el quiebre de la membrana citoplasmática lo que produce la muerte del tejido celular. Pereyra (2002, p. 478)

Una de las funciones de la Dirección Regional de Agricultura de Junín (DRAJ) a través de la dirección de estadística agraria es integrar, analizar y difundir importante sobre los daños y efectos meteorológicos en el sector agrario regional. A través de los formatos F5 elaborados por dicha institución se levanta información sobre impactos meteorológicos negativos. Para la Provincia de Chupaca junto con todos sus distritos (Chupaca, Ahuac, Chongos Bajo, Huachác, Huamancaca Chico, San Juan de Yscos, San Juan de Jarpa, Tres de Diciembre, Yanacocha) se obtuvo información del valor económico afectado en la agricultura a causa del fenómeno de las heladas en el periodo 2004-2017 tal como se indica en la Figura 5.

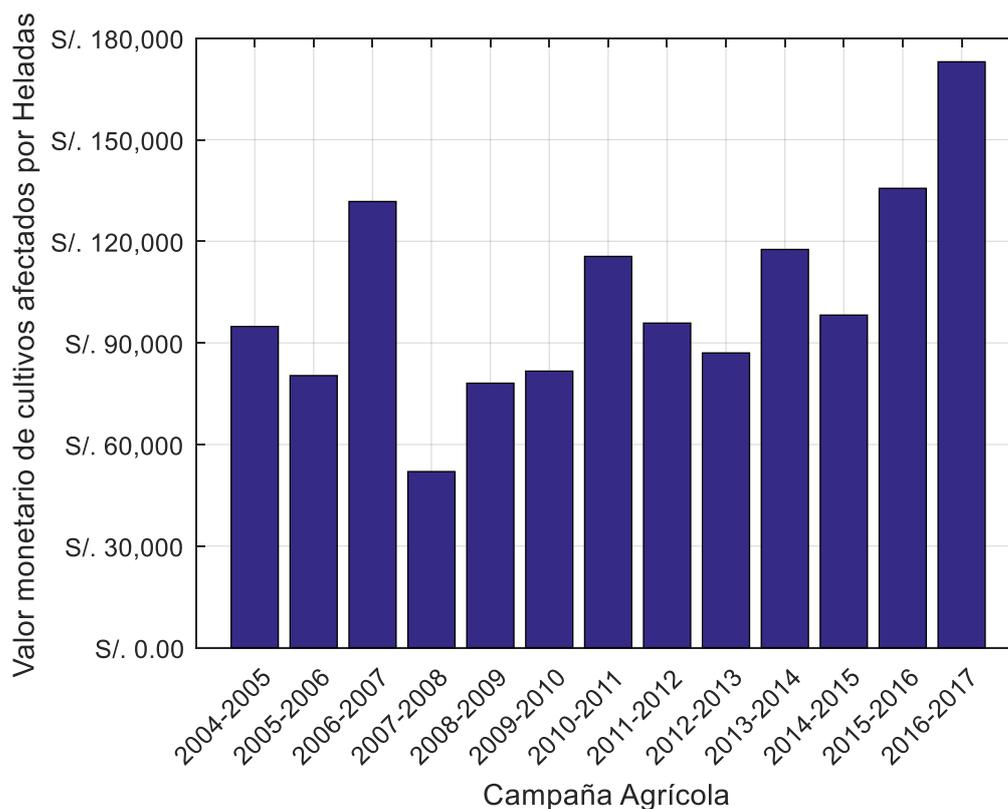


Figura 5. Valor económico de cultivos afectados por el fenómeno de las heladas en la provincia de Chupaca en periodo 2004-2017.

Fuente: Adaptado de (DRAJ, 2017)

Como se puede observar en la Figura 5, los cultivos afectados son elevados tan solo por el fenómeno de las heladas. En el valle del Mantaro es en donde anualmente se pierden millones solo por impactos meteorológicos negativos. En el periodo 2016-2017 hubo una afectación de S/. 173,018.50 (Ciento setenta y tres mil dieciocho nuevos soles con 50/100 céntimos), siendo esta la mayor ocurrida en los 13 años.

1.2.2. Técnicas de protección contra efectos de heladas

Desde tiempos antiguos, los productores luchan contra los fenómenos meteorológicos extremos propios de cada zona, un ejemplo de ello es el fenómeno de las heladas que como se mencionó antes provoca un gran daño a los cultivos causando pérdidas y daños de gran magnitud en lo agrícola y económico. En Valle del Mantaro cada año existen daños exorbitantes por el fenómeno de las heladas, ya que son muy frecuentes y de gran intensidad y que a su vez afectan a gran ámbito del Valle.



Figura 6. Efectos de las heladas en cultivos del Valle del Mantaro, julio de 2016.
Fuente: Elaboración Propia

En la lucha de los productores a nivel mundial contra los efectos de este fenómeno, es que se crean diversas técnicas que intentan mitigar sus efectos para no tener pérdidas económicas.

Tal vez una de las más conocidas a nivel de la región es la técnica del humeado que consiste básicamente en alterar el microclima local con humo producto de la que de vegetación, con el fin de generar un efecto invernadero que aumente la temperatura de la superficie de la tierra y la temperatura ambiente. Así como esta técnica, en los últimos siglos, se han creado diversos métodos que fueron recopilados por Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010).

Snyder R. (2000) indica que hay más pérdidas económicas producidas por las heladas en Estados Unidos que por otros fenómenos meteorológicos es por eso que se intenta reducir el daño. Generalmente las pérdidas económicas vas a depender de la frecuencia de las heladas y el valor del cultivo. Justifica el uso de la protección pasiva contra los daños de las heladas porque son prácticas de bajo costo a comparación de las activas y además que reducen eficazmente el potencial de daño.

Tabla 4
Diferencia entre técnicas de protección activa y pasiva contra efectos de las heladas.

Técnicas de protección pasiva	Técnicas de protección activa
Son las técnicas que se aplican antes de presentarse el fenómeno de la helada para evitar tener que necesitar una protección activa	Son las técnicas que se aplican durante el ocurrimiento del fenómeno helada para mitigar los efectos de las temperaturas bajo los 0°C

Fuente: (Snyder R., 2000, p. 43)

Esta clasificación de las técnicas de protección contra los efectos de las heladas es bien definida por Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010).

Los métodos pasivos son aquellos métodos que son puestos en marcha antes de que se forme la helada. Estos son de prevención los cuales por lo general son baratos, en cambio los métodos de protección activos son aquellos que se usan o se ponen en marcha en el momento en que se presenta el fenómeno de las heladas. Los métodos activos suelen ser más costosos que los pasivos, pero son en promedio más eficientes es por eso que se debe recomendar el correcto uso de las técnicas, para así ser más efectivo y que el gasto sea menos.

Tabla 5
Tipos de métodos de protección contra heladas, pasivos y activos

Métodos de protección contra las heladas	Pasivos	Emplazamiento de cultivos
		Drenaje de aire Frio
		Selección de plantas
		Poda Adecuada
		Cobertura de plantas
		Evitar el laboreo del suelo
		Riego
		Control bacteriano
	Activos	Estufas
		Ventiladores
		Helicópteros
		Aspersores
		Aislamiento con espuma

Fuente: (Snyder & Melo Abreu, 2010, p. 145)

En la Tabla 5 se describe algunos de los tipos de técnicas de mitigación de efectos de heladas proporcionadas por Snyder R. (2000, p. 145).

De manera general según Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010) se describen las técnicas más usadas:

Técnicas de protección pasiva:

- **Emplazamiento de cultivo**, consiste en cultivar en zonas que por experiencia de los agricultores el efecto de las heladas no son muy perjudiciales según las épocas del año; su desventaja es tener acceso a poder emplazar el cultivo, ya que tomando como ejemplo el Valle del Mantaro, todos los terrenos agrícolas ya están distribuidos, y sería muy difícil poder emplazarlos.
- **Drenaje de aire frío**, consiste básicamente en desviar el flujo de aire frío hacia una dirección que no sea la del cultivo y así poder proteger la siembra de los efectos de las heladas que son mayormente de tipo advectivo. Cabe resaltar que las heladas del tipo advectivo en el Valle del Mantaro no son muy frecuentes porque existe una predominancia de heladas del tipo radiativo. Trasmonte & Enciso (2012)
- **Selección de plantas**, consiste en escoger cultivos que por experiencia son resistentes a los efectos de las heladas o que su daño sea menor a comparación de otros cultivos. Se puede aprovechar la floración tardía por que las heladas afectarían al cultivo pero sin la floración disminuyendo así los daños.
- **Cobertura con árboles**, consiste en plantar intercaladamente plantas de mayor tamaño al del cultivo, como las palmeras que proporcionarían protección al cultivo modificando el microclima haciendo una especie de pantalla que permita el retorno de la radiación saliente del suelo logrando que la temperatura dentro del microclima creado se eleve.
- **Riego**, este método suele usarse cuando en los suelos existen espacios de aire que inhiben la transferencia de calor y su almacenamiento. Al aplicar la técnica el color del suelo se torna más oscuro y es capaz de almacenar más energía proveniente por radiación y esto generaría un aumento de temperatura del aire en la superficie del suelo, en las noches de heladas, su principal desventaja es la disponibilidad de agua para realizar el riego con antelación, ya que esta debe ser abundante tanto como para humedecer grandes extensiones de tierra de uso agrícola.
- **El control bacteriano**, consiste en combatir la de formación de hielo a partir de las bacterias de nucleación de hielo (INA), cuan mayor sea la concentración de las bacterias, habrá más probabilidad de reducir la formación de hielo y así mitigar el efecto de las heladas.

Técnicas de protección activa:

- **Estufas**, el uso de las estufas en la mitigación del efecto de las heladas es comúnmente usado en el mundo; consiste en poner estufas cerca de los sembríos para que proporcionen energía para aumentar la temperatura del ambiente haciendo que la temperatura no caiga a niveles que provoquen daños críticos a las plantas.
- **Ventiladores**, esta técnica consiste en instalar ventiladores de flujo horizontal cuyo propósito es empujar el aire horizontalmente para mezclar el aire más caliente de la parte superior con el aire frío alrededor de la superficie, sus costos para su uso son bajo pero la inversión inicial es caro.
- **Los aspersores**, esta técnica se caracteriza por tener menor consumo de energía en comparación al resto volviendo a aplicar el agua frecuentemente con el suficiente caudal para evitar que la temperatura del tejido de la planta baje a niveles dañinos.

Proteger los cultivos contra los efectos de las heladas es muy importante para los agricultores de todo el mundo, las pérdidas económicas a lo largo del mundo son muy grandes, según White & Hass (1975) en EE.UU muchas pérdidas económicas que son producidas por el fenómeno de las heladas siendo este el principal generador de perdidas comparadas con otros fenómenos meteorológicos extremos.

1.2.3. Técnica del riego pasivo

Food and Agriculture Organization of the United Nations- FAO (2010) explica de forma resumida sobre la técnica del riego en su uso como mitigante de efectos de las heladas. Existen 2 tipos de técnicas de riego: pasiva y activa. Como se explicó anteriormente los 2 tipos se diferencian fundamentalmente en el momento de aplicación de la técnica, siendo la técnica del riego pasivo usada con antelación a que se produzca el fenómeno de la helada y la técnica de riego activa usada en el preciso momento de formación de la helada. En la presente tesis se investiga sobre la técnica de riego pasivo.

Según Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010) cuando un suelo tiene muy poca humedad, es decir, cuando está seco existen espacios donde hay presencia de flujos de aire, el cual disminuye la capacidad de transferencia de energía en el suelo, es así que se plantea mantener una humedad adecuada para para almacenar energía en este y que pueda usarse en la mitigación de efectos de heladas. Se indica también que no es necesario humedecer el suelo más allá de unos 30 cm de profundidad debido a que la transferencia de energía se realiza en esta. De igual forma cuando uno aplica la técnica del riego la superficie se torna de un color más oscuro lo cual incrementa el valor de la absortividad haciendo que haya un mayor ingreso de energía por radiación, pero a la vez

cuando el suelo está húmedo existe un flujo de energía de salida por motivo de la evaporación del agua contenido en el suelo.



Figura 7. Diferencia de color entre suelos izquierda: Suelo seco, derecha: Suelo húmedo.

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma la conductividad y capacidad térmica juegan un rol muy importante en la formación de heladas, por ejemplo los suelos secos que tienen una mayor proporción orgánica tienen una conductividad térmica y capacidad térmica reducida haciendo que se produzcan temperaturas mínimas más bajas que un suelo húmedo con la misma proporción de materia orgánica. Tanto la conductividad térmica como la capacidad calorífica van a ser factores importantes en la conducción y almacenamiento de energía en el suelo. Es por eso que al tener un suelo con mayor conductividad y capacidad térmica hacen menos propenso a sufrir los efectos de las heladas

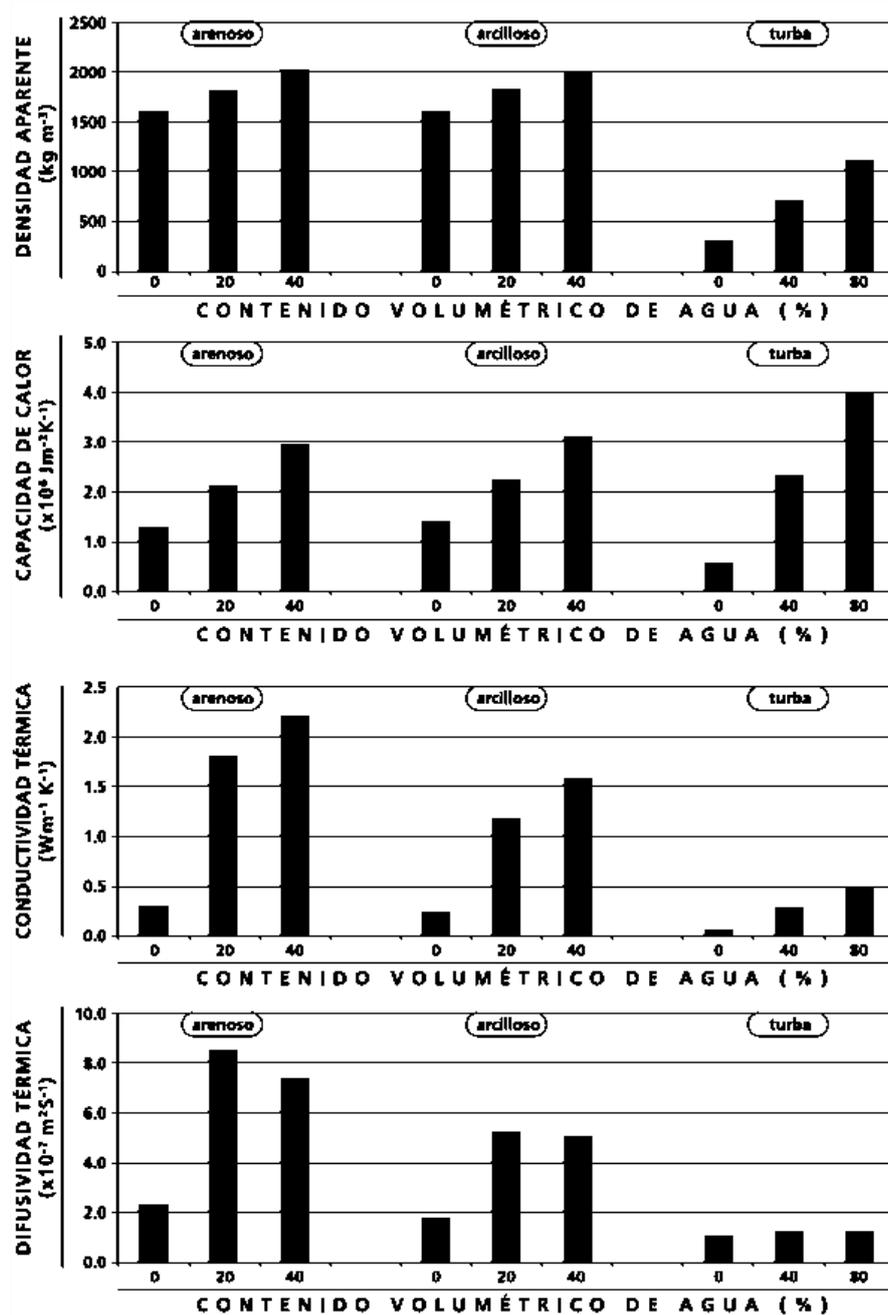


Figura 8. Propiedades térmicas típicas de suelos arenosos, arcillosos y turbas.

Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010).

De la Figura 8 si comparamos la difusividad térmica de un suelo de tipo arenoso con un suelo arcilloso para un contenido de agua de 0-40% esta siempre es más alta, lo que se traduce en que hay una mejor transferencia y almacenamiento de energía cuando un suelo está más húmedo. Por esto es que la Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010) recomienda regar la superficie con antelación para poder mitigar los efectos de una helada.

Snyder, Paw U, & Thompson (1987) explicaron en su investigación que la transferencia de energía por conducción en el suelo solo se da en los 30 cm superiores del suelo y que la diferencia horaria de la temperatura no es significativa posteriores a los 30 cm de profundidad, pero Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010) la cantidad que se debe aplicar en la técnica del riego va a variar en función al tipo de suelo, debería de aplicarse unos 25 mm para suelos arcillosos.

De igual forma Villalobos (2009) explica que la técnica del riego es un método pasivo de protección que sirve para aumentar la capacidad calorífica del suelo y su conductividad térmica. Por tanto la cantidad de calor que el suelo podrá almacenar durante el día será mayor en un suelo regado y la facilidad de que el suelo ceda calor al aire durante la noche, también será mayor.

1.2.4. Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica o también conocida como el principio de conservación de energía señala que al realizarse un proceso, la energía que interviene en él no se crea ni se destruye tan solo puede cambiar de forma, esta ley se liga principalmente al balance pudiéndose expresar como: La diferencia de energías será el resultado de la diferencia de la energía de entrada con la energía de salida:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía de} \\ \text{entrada al sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía de} \\ \text{salida del sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio de energía} \\ \text{total del sistema} \end{array} \right) \quad (1)$$

Según Çengel (2011) se puede escribir la ecuación de arriba como un balance de energía que incluya energía nuclear, química, eléctrica, mecánica de la siguiente forma:

$$Q_{\text{Entrada}} - Q_{\text{Salida}} + Q_{\text{Generado}} = \Delta E_{\text{Térmica}} \quad (2)$$

Donde el autor plantea Q como una forma de energía térmica que se puede transmitir de un sistema a otro como consecuencia de un gradiente de temperatura, en tal sentido:

$$Q_{\text{Entrada}} = \text{Calor de entrada en el sistema}$$

$$Q_{\text{Salida}} = \text{Calor de salida en el sistema}$$

$$Q_{\text{Generado}} = \text{Calor por generación de calor}$$

$$\Delta E_{\text{Térmica}} = \text{Cambio de energía térmica del sistema}$$

Para un sistema cerrado el cambio de energía térmica del sistema se expresa como:

$$\Delta E_{\text{Térmica}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

Donde:

$$\dot{m} = \text{Flujo másico}, \frac{kg}{s}$$

$$C_p = \text{Calor específico a presión constante}, \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura}, ^\circ C$$

1.2.5. Mecanismos de transferencia de energía

Para poder realizar análisis termodinámicos, modelamientos o determinar los flujos de energía que salen y/o entran al sistema se recurre a la transferencia de energía. Esta se da como resultado de un gradiente de temperatura siempre de mayor a menor temperatura señala Çengel (2011).

Incropera (2011) explica la importancia que tiene los mecanismos de transferencia de calor en las industrias e investigaciones en diversos ámbitos como la industria química, del petróleo, energías renovables, eléctrica, etc. Explica que la transferencia de calor juega un rol muy importante en el requerimiento energético de la población. Por ejemplo que casi el 60% de energía producida en EE.UU. se desperdicia en forma de calor, el 70 % de generación de energía eléctrica se pierde en forma de calor. Es por estos motivos que se realizan investigaciones para:

- Mejorar la eficiencia de procesos de generación y conversión de energía.
- Reducir las pérdidas energéticas.
- Reutilizar eficazmente el calor perdido.

Snyder R. (2000) Señala que la transferencia de energía determina la temperatura y cuan eficaz puede ser en protección de cultivos. Da importancia a su estudio para poder realizar una buena gestión de protección contra los efectos de las heladas.

Los autores mencionados realizan estudios sobre transferencia sobre: Radiación, convección y conducción.

1.2.5.1. Conducción

La transferencia de energía por conducción se da en sólidos producto de un gradiente de temperatura. Por ejemplo al someter una barra de metal a l fuego, el extremo caliente conduce energía hacia el extremo frío.

Una definición trascendente la da Çengel (2011) explicando que este mecanismo se puede dar en sólidos, líquidos y/o gases, En los fluidos (Gases y líquidos) el mecanismo se genera por las colisiones y difusión de moléculas durante su movimiento aleatorio. En cambio en sólidos se genera por vibraciones y transporte de electrones.

El flujo de calor por conducción va a depender de diferentes factores: Configuración geométrica, espesor del material, tipo de material y la diferencia de temperatura. Si nosotros consideramos una placa grande de área “A”, con espesor “ε” que tiene una conductividad térmica “K” y un gradiente de temperatura en 2 lados opuestos “ΔT” podemos expresar al flujo de energía por conducción de forma unidimensional de la siguiente manera

$$Q_{\text{Conducción}} = -k \cdot A \frac{\Delta T}{\varepsilon} \quad (4)$$

Que expresada de otra forma resulta la famosa Ley de Fourier para la conducción de Calor.

$$Q_{\text{Conducción}} = -k \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Se puede determinar el flux de calor, que es el flujo de calor dependiente del Área:

$$\dot{Q}_{\text{Conducción}} = \frac{Q_{\text{Conducción}}}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Si escribimos la ecuación en forma vectorial con gradiente en un espacio de 3 dimensiones es:

$$\dot{Q}_{\text{Conducción}} = -k \nabla T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (7)$$

Donde ∇T es el operador gradiente

De igual forma define Incropera (2011). El da unas características claves de la transferencia de calor por conducción y la ley de Fourier:

- Es una ley basada en experimentos.
- Es una ley que define la conductividad térmica del material.
- La dirección de las temperaturas siempre será decreciente (de mayor a menor).
- La ley de Fourier se aplica a toda materia (Sólido, Líquido y gas)

Para Snyder R. (2000) es la transferencia de energía por conducción es uno de los más importantes mecanismos en la formación de heladas, y por ende será factor muy importante en la técnica del riego pasivo.

1.2.5.1.1. Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad física propio de cada material que cuantifica la capacidad de conducción de calor que puede conducir el material. La denotaremos como “ k ” y sus unidades en el sistema internacional es $\frac{W}{K.m}$.

Çengel (2011) define la conductividad térmica como la relación de transferencia de energía a través de un material con un espesor definido por unidad de área por unidad de temperatura. La dependencia de la conductividad con la temperatura es a veces muy complejo de usar en los cálculos, por ende es común determinar una conductividad promedio y tratarla como constante en los cálculos.

Se muestra las conductividades de diferentes materiales en la siguiente tabla:

Tabla 6
Valores de conductividad térmica en distintos materiales.

Material	$k, \frac{W}{K.m}$
Diamante	2300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (Liq.)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (Liq.)	0.607
Aire	0.026

Fuente: (Çengel, 2011, p. 361)

1.2.5.1.2. Capacidad calorífica

La capacidad calorífica (C) es el producto de la densidad aparente con el calor específico ($\rho \cdot C_p$). El calor específico ($C_p, \frac{W}{kg.K}$) expresa la cantidad de calor que se debe suministrar a una cantidad determinada de masa para poder elevar $1^\circ C$, en cambio la capacidad calorífica ($C, \frac{W}{m^3.K}$) la cantidad de calor que se debe suministrar para un determinado volumen. A

continuación se muestran algunos valores típicos de capacidad calorífica para distintos materiales.

Tabla 7
Valores de capacidad calorífica en distintos materiales.

Material	$C, \frac{J}{K \cdot kg}$
Agua	1000
Acero	950
Tierra seca	660
Granito	529
Madera de roble	430
Ladrillo	400
Madera de pino	384
Piedra arenisca	374
Piedra caliza	484
Hormigón	350
Fibra de vidrio	2.8
Aire	0.29

Fuente: (Çengel, 2011, p. 367)

1.2.5.1.3. Difusividad térmica

La difusividad térmica (α) es la relación entre el calor conducido con el calor almacenado, es decir, la relación entre conductividad térmica con la capacidad calorífica por unidad de volumen de un material, Çengel (2011) explica que para tener un mayor valor de difusividad térmica la propagación de calor por en medio debe ser muy rápida, y para valor pequeño, la mayor parte de la energía térmica debe ser absorbido por el material y tan solo una pequeña porción de esta debe ser conducida.

Tanto la conductividad como la capacidad térmica van a depender del tipo de suelo y de sus condiciones, en la Tabla 8 se muestran valores típicos de diferentes materiales.

Tabla 8
Valores de capacidad calorífica en
distintos materiales

Material	$C * 10^6, \frac{m^2}{s}$
Plata	149
Oro	127
Cobre	113
Aluminio	97.5
Hierro	22.8
Mercurio (Liq.)	4.7
Mármol	1.2
Hielo	1.2
Agua (Liq.)	0.14
Suelo Seco	0.52

Fuente: (Çengel, 2011, p. 412)

1.2.5.2. Radiación

El sol es la principal fuentes de energía para el mundo, su energía llega desde el sol en forma de ondas electromagnéticas después de interactuar con elementos de la atmosfera. El sol emite una radiación de $3.8 * 10^{26} W$ y tan solo llega a la tierra $1.7 * 10^{17} W$ pero aún así es suficiente para mantenerla caliente y mantenerla con vida con el proceso de la fotosíntesis. La energía del sol es producida por una reacción de fusión de 2 átomos de hidrógeno para formar helio es por eso que el sol es considerado como un reactor nuclear.

La energía solar que llega a la tierra por área es denominada irradiancia solar cuyo valor es:

$$G_s = 1373 \frac{W}{m^2} \quad (8)$$

1.2.5.2.1. Ley de Planck

La ley propuesta por Planck en 1900, describe la cantidad de radiación electromagnética que es emitida por un cuerpo negro a una temperatura y longitud de onda establecida. Esta ley se expresa como:

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad , \quad \frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \quad (9)$$

Donde:

$$C_1 = 3.74177 \cdot 10^8, W \cdot \frac{\mu m^4}{m^2}$$

$$C_2 = 1.43878 \cdot 10^4, W \cdot \frac{\mu m}{K}$$

T =Temperatura absoluta de superficie, K

λ =Longitud de onda de radiación emitida

1.2.5.2.2. Ley de desplazamiento de Wien

Willy Wien en 1984 desarrolló una relación que se deriva aplicando la termodinámica de su época. Ésta se obtiene derivando la ecuación 9 con respecto a la longitud de onda (λ) manteniéndola a temperatura constante e igualando a cero. La relación es la siguiente:

$$\lambda = P_M/T \quad (10)$$

Donde:

P_M =Poder máximo de emisión a Temperatura Constante, $2897.8 \mu m \cdot K$

T =Temperatura de emisión, K

A partir de esta relación es posible calcular la longitud de onda en donde se ubican los picos de las curvas de emisiones.

1.2.5.2.3. Ley de Steffan Boltzman

La intensidad de radiación se puede calcular como el área bajo la superficie de las curvas de emisión. El área mediante una integral de la ley propuesta por Planck (Ec. 9) sobre todos los espectros de longitudes de onda:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (11)$$

Donde:

σ =Constante de Stefan-Boltzmann, $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4}$

T =Temperatura de emisión, K

La relación de arriba es conocida como la ley de Stefan-Boltzmann que determina la radiación total emitida por un cuerpo negro en todo el rango de longitudes de onda.

1.2.5.2.4. Propiedades de radiación

Un cuerpo negro es considerado como un absorbedor y emisor perfecto y que emite la máxima radiación posible a comparación de un cuerpo gris a la misma temperatura.

Las superficies poseen propiedades radiativas que determinan los flujos de entrada y salida a través de su superficie, estas propiedades son la emisividad, absorptividad que se definen a continuación.

❖ Emisividad

La emisividad de una superficie representa la fracción de energía emitida por la superficie frente a la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, por ende para un cuerpo negro se considera $\varepsilon = 1$, se define:

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (12)$$

Se aprecia que esta propiedad depende de la temperatura del cuerpo ya que la radiación que se emite ($E(T)$) es comparada con la radiación de un cuerpo negro a la misma temperatura ($E_b(T)$).

Se debe tener precaución al usar datos de emisividad proporcionados por la biografía, porque esta propiedad depende de las condiciones de superficie como su limpieza, aspereza, actividad biológica, etc. Es por eso que se tiene incertidumbre sobre los valores de emisividad para caracterizar superficies. Çengel (2011)

❖ Absortividad

La absorptividad es una propiedad que determina la fracción de radiación absorbida por la superficie. Esta propiedad depende de la dirección (θ, ϕ) y la longitud de onda presente (λ), se expresa:

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{E_{\lambda,abs}(\lambda, \theta, \phi)}{E(\lambda, \theta, \phi)} \quad (13)$$

Algunos autores mencionan la dependencia de la temperatura con la absorptividad, pero influencia es muy pequeña para ser considerada en la propiedad. Incropera (2011)

Si trabajamos con superficie que tengan una media de dirección es podemos definir a la absorptividad como:

$$\alpha_{\lambda}(\lambda) = \frac{E_{abs}(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (14)$$

La cual es denominada como Absortividad espectral. Si a esta relación la consideramos un promedio integrado en todo de rango de longitud de onda obtenemos la radiación total obtenida:

$$\alpha = \frac{E_{abs}}{E} \quad (15)$$

Donde:

E_{abs} = Radiación absorbida, $\frac{W}{m^2}$

E = Radiación incidente, $\frac{W}{m^2}$

❖ Reflectividad

La reflectividad es la fracción de la energía recibida que es reflejada por la superficie, esta propiedad depende principalmente de la dirección de la radiación incidente y reflejada, pero convenientemente se trabaja un promedio de dirección que no trabaje con la distribución direccional de la reflectividad. Se expresa:

$$\delta = \frac{E_{ref}}{E} \quad (16)$$

En la siguiente figura se muestra la relación entre absorptividad y reflectividad

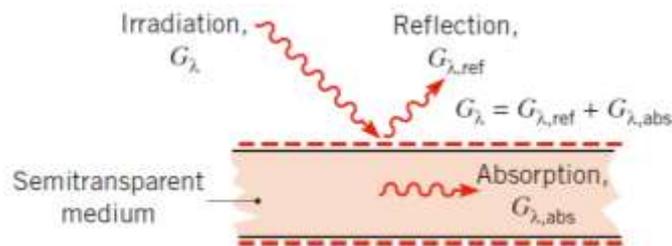


Figura 9. Relación entre absorptividad y reflectividad.

Fuente: (Çengel, 2011. P.356)

Según la teoría, en un cuerpo opaco (Que permite el paso de la radiación) se cumple una relación entre la absorptividad y reflectividad:

$$E_{ref} + E_{abs} = 1 \quad (17)$$

En la presente investigación se consideran iguales el valor del albedo con el valor de la reflectividad.

1.2.5.3. Convección

La energía que se transfiere a través de fluidos es denominada calor convectivo. La ley de enfriamiento de Newton enuncia que cuando hay un gradiente de temperaturas entre un cuerpo y el medio en donde se posiciona, la transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperaturas de ambas. Newton observó cómo cuerpos calientes se enfriaban en un ambiente de baja temperatura y describió la siguiente expresión:

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A_h \cdot (T_s - T_a) \quad (18)$$

Donde:

Q =Calor transferido al medio ambiente, $\frac{W}{m^2}$

t = Tiempo de transferencia de energía, s

h = Coeficiente convectivo de transferencia de energía, $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$

A_h = Área de transferencia convectiva de la superficie, m^2

T_s = Temperatura superficial, $^\circ K$

T_a = Temperatura ambiente, $^\circ C$

Según Çengel (2011) la convección se clasifica en convección natural y forzada, estos dependen de la forma de inicio del flujo del fluido. Para una convección forzada se necesita que el flujo sea producido de forma forzada haciendo contacto con la superficie, en la convección natural la velocidad del fluido es causado por medio naturales. Los tipos se pueden apreciar en la siguiente figura:

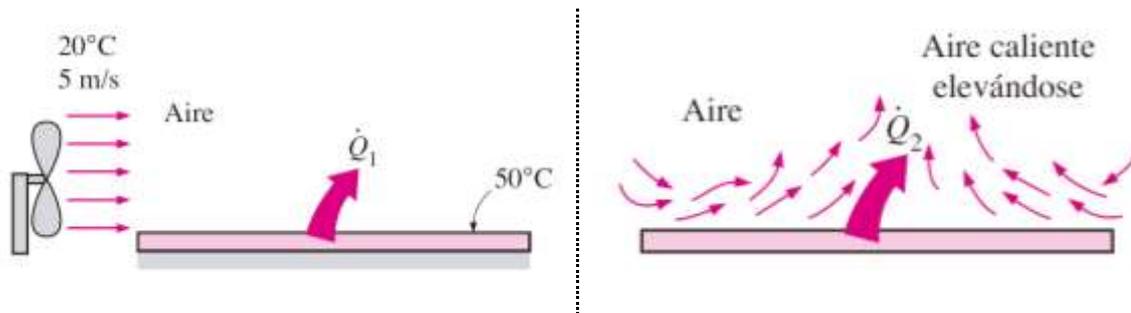


Figura 10. Diferencia entre convección forzada (Izquierda) y natural (Derecha).

Fuente: (Çengel , 2011, p. 684)

La transferencia de calor por convección es muy compleja ya que el fluido se puede calentar o enfriar al contacto con la superficie e inmediatamente esta porción de fluido se pone en contacto con otros más calientes o fríos iniciando una conducción entre porciones del fluido. Para poder cuantificar el calor que se cede por convección, es necesario determinar propiedades del fluido como: Viscosidad, conductividad térmica, densidad, calor específico y su velocidad así como también algunas de las propiedades de la superficie como su aspereza. Al tener muchas variables que rigen este proceso, hacen de este el más complejo mecanismo de transferencia de calor. Çengel (2011, p. 642).

En la transferencia por convección se da en fenómeno de **condición de no deslizamiento**, que es el adherimiento de una capa de fluido en la superficie del cuerpo por efectos viscosos que hacen que la velocidad cerca a la superficie sea nula lo que realiza un efecto desacelerador con las capas superiores por efecto de la viscosidad. Este fenómeno es causante del perfil de velocidad del fluido.

Esta condición es muy usada por el motivo de que la transferencia de calor en la superficie de contacto es por conducción pura ya que la velocidad en este punto es nula. Resultando:

$$Q_{conducción} = Q_{convección} = -k \frac{dT}{dy}_{y=0} \quad (19)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección varía linealmente a lo largo de la perpendicular de la dirección del viento, este coeficiente se determina de manera adecuada con un promedio de valores o a una determinada distancia de la superficie.

Los flujos pueden ser de dos formas: Laminar y turbulento, el primero se caracteriza por un movimiento de las capas altamente ordenado y suave, el segundo se caracteriza por fluctuaciones de la velocidad de movimiento muy desordenado. El movimiento que se ubica entre las 2 formas se denomina de transición. Una forma de caracterizarlos es con el denominado número de Reynolds (Re), este va a depender de la geometría del cuerpo, su

aspereza, velocidad de flujo, temperatura de superficie y clase de fluido principalmente. Esta razón adimensional se puede expresar como:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (20)$$

De donde:

V = Velocidad de capa superior, $\frac{m}{s}$

L = Longitud característica del cuerpo, m

μ = Viscosidad cinemática del fluido, $\frac{m^2}{s}$

ρ = Densidad del fluido, $\frac{kg}{m^3}$

El parámetro tal vez más importante en la transferencia de energía por convección es el coeficiente de convección por que establece la razón de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia de temperatura.

Este parámetro tiene diversas formas de ser calculado, la más conocida y enseñada con fines académicos es la que propone Incropera (2011) para flujo laminar y turbulento:

Laminar:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.664 * Re_L^{0.5} * Pr^{0.33} \quad Re_L < 5.10^5 \quad (21)$$

Turbulento:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.037 * Re_L^{0.8} * Pr^{0.33} \quad 5.10^5 \leq Re_L \leq 10^7 \quad (22)$$

Donde:

Nu = Número de Nusselts

k = Conductividad térmica del fluido, $\frac{W}{m^2 \cdot C}$

Pr = Número de Prandtl

El número de Prandtl es la relación adimensional entre la difusividad molecular de cantidad de movimiento con difusividad molecular de calor, que se expresa:

$$Pr = \mu \frac{c_p}{k} \quad (23)$$

Donde:

c_p = Capacidad calorífica a presión constante, $\frac{J}{kg.^{\circ}C}$

El número de Nusselts es la relación entre el coeficiente de transferencia por convección con el de conducción, esta se denota:

$$Nu = L \frac{h}{k} \quad (24)$$

Sartori (2006) realiza una comparación entre todas las relaciones usadas en la actualidad para determinar la relación más precisa para determinar el coeficiente de convección. Los resultados son comparados con mediciones experimentales. Concluyó que las siguientes relaciones son las que menos error presentan:

Laminar:

$$h = 3.83 v^{0.5} L^{-0.5} \quad (25)$$

Turbulento:

$$h = 5.74 v^{0.8} L^{-0.2} \quad (26)$$

Donde:

v = Velocidad del fluido, $\frac{m}{s}$

L = Longitud característica de superficie, m

1.2.6. Albedo

El albedo es un valor que indica la reflectividad de la superficie terrestre en cuanto a la energía recibida por radiación directa y difusa, las superficies claras tienen un valor de albedo mayor que las oscura ya que la absortividad de un cuerpo oscuro es mayor que la de un cuerpo claro. Volkheimer (2005)

Otra definición señala que el albedo es la relación de la energía reflejada desde una partícula o superficie con energía incidente. Su valor oscila entre 0-1. Porteous (1992).

Coakley (2003) Recopiló valores de albedo para diferentes superficies que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9
Valores típicos de albedo en diferentes cubiertas

Superficie	Albedo
Cultivo mixto, hierba alta	0.24
Pastizales altos, medianos	0.30
Matorrales de hoja	0.20
Pastizales cortos	0.30
Bosque	0.30
Bosque tropical	0.30
Bosque de hoja ancha	0.20
Praderas	0.25
Desierto	0.50
Tundra	0.25
Nieve	0.33
Hielo marino	0.50

Fuente: (Coakley, 2003, p.53)

Idso, Jackson, & Reginato (1975) estudiaron la influencia de la humedad del suelo en el valor del albedo, demostraron que una superficie mojada tiene un valor de albedo menor en comparación con una superficie mojada:

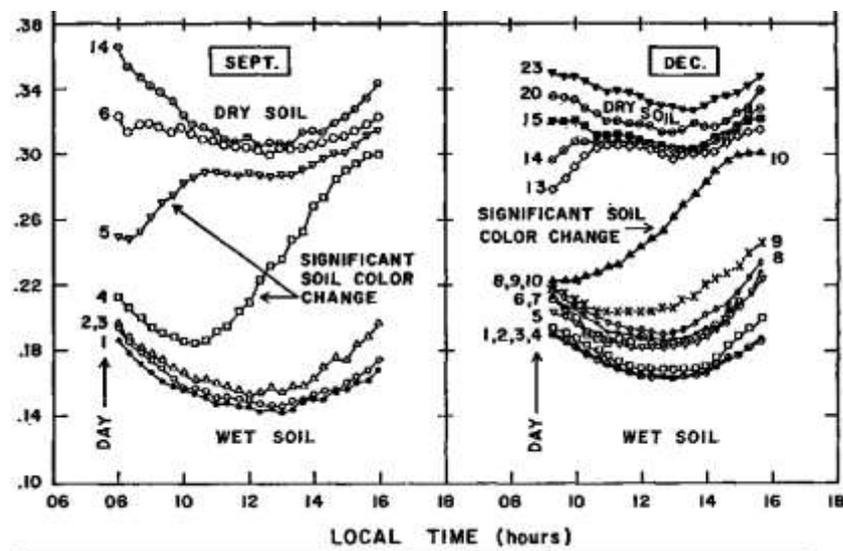


Figura 11. Comportamiento del albedo en función a la humedad del suelo.
 Fuente: Idso, Jackson, & Reginato (1975).

En la Figura 11 se muestra que hay un incremento del albedo del suelo en función a cambio de color de la superficie que está determinado por la humedad del suelo, es decir, si el suelo está húmedo, su superficie es más oscura haciendo que el albedo sea menor a comparación de un suelo seco.

De igual forma estableció una relación entre la humedad relativa del suelo frente al albedo graficando curvas de valores de humedad relativa del suelo para un rango de 0%-32% a diferentes profundidades, la figura es usada en la investigación y es adaptada y mostrada en el siguiente capítulo.

Cabe resaltar que todas las mediciones las realizaron en un suelo liso y desnudo, de textura franca en Arizona, EE.UU.

Alonso (2014) explica la relación entre albedo y absorptividad del suelo, diciendo que la reflectividad es sinónimo de albedo y que en general para una superficie terrestre se cumple la siguiente relación:

$$\alpha + \gamma = 1 \quad (27)$$

Donde:

α = Absortividad del suelo

γ = Albedo del suelo

1.2.7. Tipo de suelo

Según Idso, Jackson, & Reginato (1975) el tipo de suelo es un factor determinante en las propiedades térmicas del mismo. Las propiedades como capacidad y conductividad térmica varían según el tipo de suelo.

Garay & Ochoa (2010) realizaron una clasificación de los tipos de suelo agrícola del Valle del Mantaro en función a su textura, pH, cantidad de materia orgánica. La información fue recabada en el laboratorio de análisis de Suelos del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) de Huancayo.

El Valle del Mantaro comprende 4 provincias: Jauja, Concepción, Chupaca, Huancayo con una extensión de 3558.10 km² y constituye el espacio agrícola más amplio de la sierra del Perú y se estima que 40000-70000 ha son cultivadas anualmente (Gobierno Regional, 2015). La presente investigación está ligada principalmente al tipo de suelo que predomina en el Observatorio del Huayao que pertenece al distrito de Huachac, Chupaca.

La provincia de Chupaca posee una extensión de 3067.52 km² con una población de 51340 habitantes al año 2010. Chupaca se caracteriza por extenso territorio dedicado a la agricultura.

La clasificación realizada para la provincia de Chupaca es:

Tabla 10

Tipo de textura de suelo en diferentes distritos de la Provincia de Chupaca.

Textura de Suelo	Porcentaje de tipo de suelo en Provincia de Chupaca						
	Ahuac	Chongos Bajo	Chupaca	Huachac	Huamancaca Chico	Iscos	3 de Diciembre
Arcilloso	-	25	7.94	8.33	20	14.29	16.67
Franco Arcilloso	30	37.5	17.46	16.67	40	42.86	33.33
Franco Arcilloso arenoso	40	37.5	55.56	66.67	30	14.29	33.33
Franco limoso	-	-	4.76	-	-	-	-
Franco	10	-	3.17	-	-	-	-
Franco arenoso	20	-	11.11	8.33	10	28.57	16.7

Fuente: Adaptado de (Garay & Ochoa, 2010, 56)

Nótese que en los distritos de Ahuac, Chongos Bajo, Chupaca, Huachac y 3 de Diciembre el tipo de suelo predominante es franco arcilloso arenoso. Del estudio realizado se determinó que el tipo de suelo propio del observatorio del Huayao es Franco Arcilloso Arenoso.

El estudio concluyó que el tipo de textura de suelo predominante en el Valle del Mantaro, es Franco Arcilloso Arenoso seguido de franco arenosos.

1.2.8. Modelo matemático

Un modelo matemático representa un proceso real de forma significativa con simbología matemática. Si una persona quiere entender, planificar, controlar, evaluar procesos de carácter complejos es necesario conocer el funcionamiento de este. Tal vez en nuestra actualidad una forma sería construir una réplica del fenómeno a escala y así poder observar cómo influyen los parámetros de entrada en las variables de estudio. Uno de los grandes inconvenientes es el tema económico, porque realizar procesos que sean similares de forma significativa conlleva a un gran gasto económico, es por eso que resulta mucho más factible y económico emplear un método de representación conceptual del proceso es decir usar un modelo matemático que describa el proceso de forma eficaz.

Los ingenieros tienen una gran influencia en la construcción de modelos matemáticos, ellos siguen cierta metodología de perfeccionamiento. Empiezan realizando un modelo matemático simple poco realista pero que describa bien el proceso real, entonces es cuando se realiza un análisis de las relaciones matemáticas junto con condiciones de frontera del proceso intentando buscar deficiencias y así poder mejorar el modelo pero que siga siendo sencillo para su tratamiento matemático.

Se sabe que al realizar un modelo no se siempre contará con todos los parámetros necesarios, siempre se usará los más relevantes y que más influencia tienen en el proceso, existirán parámetros que son muy difíciles de medir por lo que el ingeniero debe construir un modelo que cuente con la mayor cantidad de parámetros posibles pero cuando esta sea representado debe tener un razonable grado de confianza.

Antes de realizar un modelo se debe realizar un análisis para modelos Himmelblau & Bischoff (2004), que lo definen de la siguiente forma:

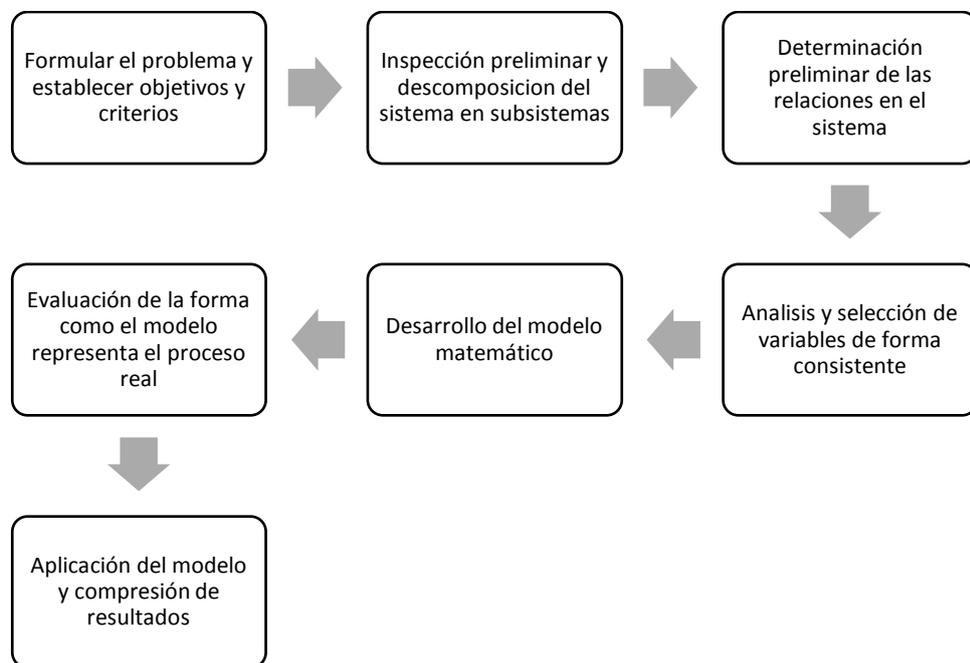


Figura 12. Estructuración para análisis de procesos físicos.

Fuente: (Himmelblau & Bischoff, 2004, p. 36)

Himmelblau & Bischoff (2004) explican que el proceso debe dividirse en sistemas para su correcto análisis y estudio y al momento de integrarlo en un solo sistema este sea capaz de representar confiablemente el proceso físico real. La mayoría de subsistemas pueden ser representados matemáticamente.

Tipos de modelos

En el campo de la investigación científica es común utilizar la palabra modelo, pero existen clases de modelos definidos según las relaciones que se usen en él.

Himmelblau & Bischoff (2004) Los clasifica de la siguiente forma:

Tabla 11

Tipos de modelos matemáticos

TIPO DE MODELO	DEFINICIÓN
Modelo de Fenómeno de Transporte	Modelo donde intervienen principios fisicoquímicos.
Modelo de Balance de Población	Modelos clásicos donde intervienen balances poblacionales.
Modelo Empírico	Modelo donde interviene datos experimentales ajustados.

Fuente: (Himmelblau & Bischoff, 2004, p. 66)

Un modelo de fenómenos de transporte abarca principios fisicoquímicos aplicados en balances de materia, energía y/o momento, por otro cuando nos referimos a tiempo de residencia u otras definiciones en función al tiempo hablamos de un modelo de balance poblacional y por últimos cuando utilizamos regresiones matemáticas para ajustar datos experimentales nos referimos a un modelo empírico.

El modelo de fenómeno de transporte se puede clasificar dependiendo del término de acumulación que presente el sistema. Esta clasificación es la más conocida, estado estacionario y no estacionario o dinámico.

En concreto, estado estacionario significa que al realizar el balance de masa, energía o momento, el término de acumulación es cero, mayormente se expresa las variables de salida como constantes con respecto al tiempo pero para poder realizar control a un proceso es necesario conocer desde el momento inicial, la variación de las variables con respecto al tiempo. Esta variación es propia de estado no estacionario o dinámico.

2 definiciones de tipos de modelos usados en la presente investigación es la denominada por Hernandez (2011): Descriptivo y de optimización. El modelo descriptivo es una descripción matemática de un proceso real del sistema, este tipo de gran ayuda para poder evaluar

resultados y analizar el proceso. El modelo que después de ser evaluado se optimiza el proceso de acuerdo con los parámetros de entrada de denomina Modelo de optimización.

1.2.9.Simulación

La simulación es la aplicación, estudio y/o evaluación que se logra manipulando las representaciones matemáticas o del modelo establecido. Himmelblau & Bischoff (2004, p. 34).

Para Islas (2014) la simulación es la repetición del proceso, mediante los resultados del modelo matemático observando su comportamiento a diferentes condiciones de entrada y que por lo general se realiza con medios computacionales por la rapidez que brinda.

Las ventajas de la simulación de procesos vienen dadas por Himmelblau & Bischoff (2004) a continuación:

- a** Económica: Los procesos simulados son estudiados de forma más rápida económica y completa que cuando se realiza de un proceso real.
- b** Extrapolación: Teniendo un modelo matemático confiable, la simulación es capaz de ensayar condiciones que en un proceso real no se podría dar.
- c** Evaluación: Con la simulación se es capaz de evaluar comparando diversas situaciones con introducción de nuevos parámetros. Esto nos permite desarrollar hipótesis sobre sistemas antes de ponerlos en marcha.
- d** Repetitividad: Una de las mejores ventajas de la simulación. Con esta se puede ensayar con diversos parámetros de entrada sin tener efecto alguno, repitiéndose las veces necesarias, no contando con la incertidumbre que se generaría si aplicase en un proceso real.
- e** Control: La simulación constituye una importante herramienta en el control de procesos, esta reduce considerablemente el tiempo para llegar a un control de proceso adecuado.
- f** Sensibilidad de parámetros: Con la simulación es fácil determinar la influencia de los parámetros de entrada en la salida, determinando cuan sensible son los parámetros de salida con respecto a las de entrada.
- g** Estabilidad: Con la simulación se puede ensayar diferentes ámbitos en cuales el proceso está sometido a diferentes variables perturbadoras para llegar una estabilidad de proceso.

Guevara (2016) plantea una metodología típica de desarrollo de un modelo con inclusión de la simulación del proceso. Se detalla en la siguiente figura

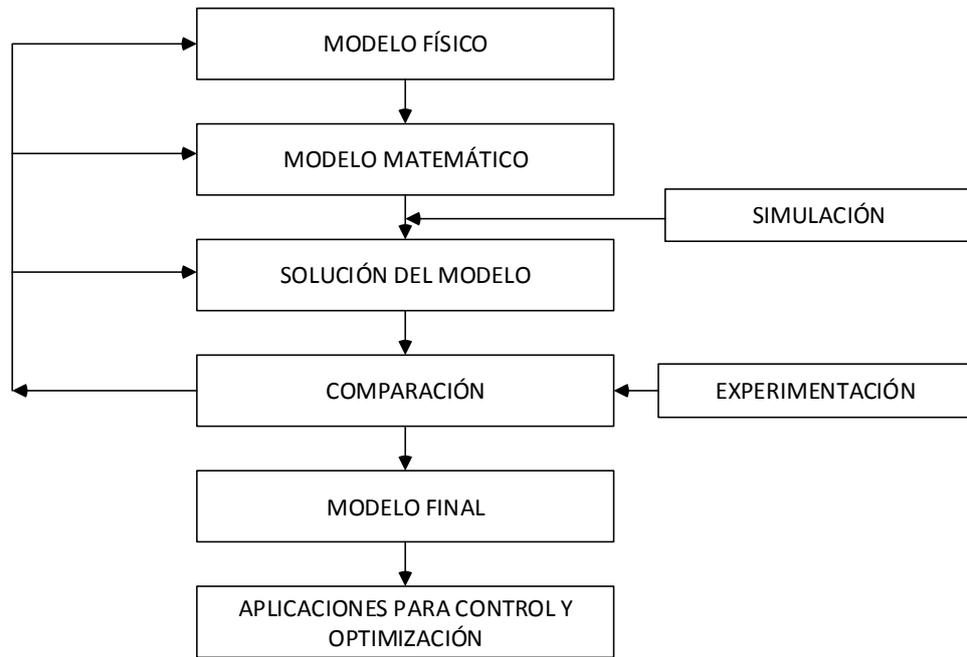


Figura 13. Metodología de desarrollo de un modelo matemático.
Fuente: (Guevara, 2016)

1.2.10. Optimización

Scena (1999) define a la optimización como el proceso de selección a partir de un conjunto posible de soluciones, aquella que cumpla eficazmente los objetivos que se proponen para el proceso.

Himmelblau & Bischoff (2004) señalan que actualmente el control y la optimización constituyen los pilares más importantes de la industria, haciendo que la industria que las aplique se desarrolle con eficacia.

Para optimizar un proceso se necesitan 2 etapas:

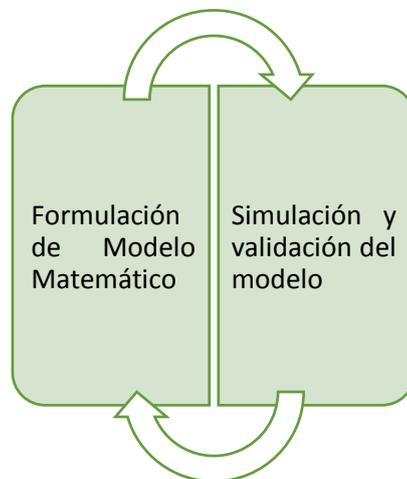


Figura 14. Etapas de optimización de un proceso.
Fuente: Adaptado de Scena (1999)

El proceso de optimizar no tiene una metodología establecida, requiere de ingenio y creatividad. Después de elaborar y validar el modelo matemático, se trabaja con él a través de su simulación por computadora encontrando los parámetros que ayudarán a tener un proceso eficaz, es decir, optimizar el proceso.

1.2.11. Control

El objetivo del control de procesos es mantener en un valor de operación ciertas variables del proceso como temperatura, presión, etc.

El control es aplicado generalmente a sistemas dinámicos ya que en este existen cambios de los valores de variables en función al tiempo y muy frecuentemente estos valores necesitan tener un arreglo según lo disponga la teoría para poder optimizar el proceso.

Al referirnos al control de procesos es necesario entender lo que es una variable controlada y manipulada.

La variable controlada es la que se debe mantener o controlar dentro de un rango de valor especificado.

Las variables manipuladas son aquellas que tiene una influencia en la variable controlada y es por eso que se utiliza esta para mantener la variable de controlada en un punto o rango de control.

Los motivos por el cual se usa el control de procesos son para la perspectiva de nuestro trabajo:

- Mantener la temperatura de superficie del suelo mayor a 0°C.
- Disminuir total o parcialmente los daños por heladas.
- Evitar pérdidas económicas por daños de heladas al mantener una temperatura de superficie mayor a 0°C.

1.2.12. Validación de modelo matemático

La validación de un modelo es uno de los procesos del modelamiento matemático que determina un grado de confianza que sirve como justificación del uso del modelo elaborado. Prada (2007, p. 78)

La validación se define como la comparación de la simulación del modelo matemático con datos observados del proceso a fin de determinar si el modelo es adecuado para su uso.

A lo largo de los años se desarrolló diferentes técnicas para validar modelos, una de las técnicas fue estudiada por Medina, Vargas, Navarro, Canul, & Peraza (2010) en donde utilizan las medidas de desviación para comparar los valores observados con lo simulados.

Las medidas de desviación son:

Eficiencia de Modelado (MEF), establece la concordancia entre valores observados con valores predichos. Su valor ideal es 1 y si su valor fuese negativo los valores simulados por el modelo son tan inexactos que sería mejor usar la media de estos.

$$MEF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (28)$$

Coefficiente de determinación de Modelo, indica la proporción de la variación total de los datos observados con los simulados. Su valor adecuado es 1, si es superior a 1 es un indicador de subestimación y si es mayor a 1 es indicador de sobrestimación sobre datos observados.

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{y})^2} \quad (29)$$

Coefficiente de error, es una medida promedio relativa de diferencias absolutas que es expresada como relación de la media de valores observados. Su valor adecuado es 0, es muy usado para describir el ajuste del modelo a los datos observados.

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - z_i|}{n * \bar{y}} \quad (30)$$

Donde:

\hat{y}_i = i-ésimo valor predicho por la recta de regresión ajustada.

y_i = Valor i-esimo observado.

z_i = Valor i-ésimo valor predicho por el modelo.

\bar{y} = Media Aritmética de las observaciones.

n = Número de datos.

1.2.13. Modelo matemático propuesto

Las consideraciones que se tomaron para elaborar el modelo matemático son:

- El modelo describe la temperatura de superficie en un horario nocturno de 19:00h – 06:00h del día posterior.
- No se consideran flujos de calor latente, por la ausencia de evaporación de agua en un horario nocturno.
- Las propiedades físicas del suelo no varían con respecto a la profundidad.

- El modelo trabaja en estado dinámico.

El modelamiento empezó tomando un elemento diferencial en una sola dimensión para el cuerpo en estudio, tal como se muestra en la siguiente figura:

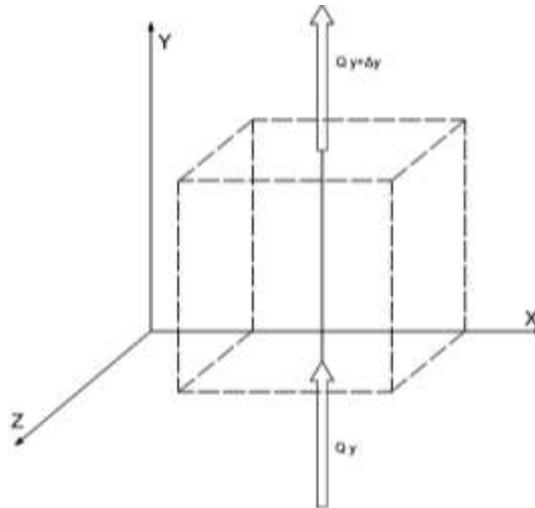


Figura 15. Flujo de calor de entrada y salida a un elemento diferencial.

Fuente: Elaboración Propia.

Realizando un balance de energía a través del elemento diferencial tenemos:

$$\text{Acumulación de energía} = \text{Calor que entra al elemento diferencial en eje } y - \text{Calor que sale del elemento diferencial en eje } y \quad (31)$$

No existe generación de energía por parte del elemento diferencial.

Utilizando la Ley de Fourier, en el cual el flujo de calor es proporcional a la conductividad térmica, el área transversal y gradiente de temperatura en dirección de trasmisión, se tiene:

$$\frac{d}{dt}(\Delta x \Delta y \Delta z \rho C_p T) = -k \Delta x \Delta z \frac{dT}{dy}_y - \left(-k \Delta x \Delta z \frac{dT}{dy}_{y+\Delta y} \right) \quad (32)$$

Dividiendo a la ec. 36 entre $\Delta x \Delta y \Delta z$ y aplicando límites tal que $\Delta y \rightarrow 0$ obtenemos:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \left[\frac{\frac{dT}{dy}_{y+\Delta y} - \frac{dT}{dy}_y}{\Delta x} \right] \quad (33)$$

Aplicando la definición de derivada a la ec. 33 se tiene:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (34)$$

La ec. 34 viene a ser la conocida ecuación de difusión de calor en un medio sólido en forma unidimensional.

Condiciones de frontera

En la siguiente figura se puede observar el volumen de estudio en la presente investigación como parte significativa del suelo. De este se tomará las condiciones de frontera tanto en la superficie como en el límite inferior.

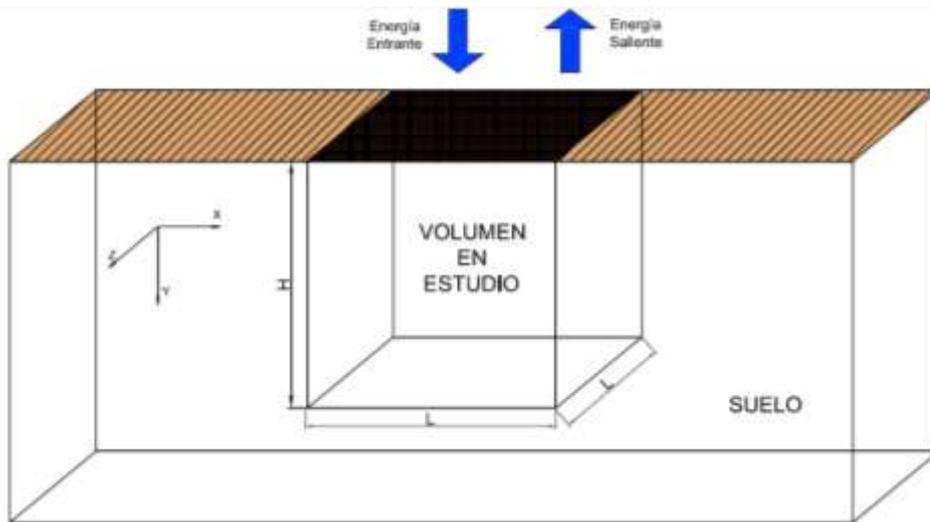


Figura 16. Caracterización de los límites de la parcela experimental, para observar condiciones de frontera.

Fuente: Elaboración Propia

Condición de frontera en Límite inferior

Existe un perfil de temperatura en el suelo que normalmente tiene un comportamiento exponencial. Para obtener la condición de frontera en el límite inferior, necesitamos analizar la variación de temperatura en función a la profundidad y al tiempo. Se sabe que los niveles más cercanos a la superficie tienen mayor variabilidad de temperatura y los niveles más lejanos de la superficie casi no presentan variación alguna, es por eso que se debe elegir una profundidad que sea lo suficiente para que no varíe en forma temporal ni con la profundidad del suelo. Esta condición es la de Dirichlet y tiene la siguiente forma:

$$T(y = H, t) = T_H$$

Condición de frontera en Límite Superior

En el límite superior (Superficie) sucede la mayor transferencia de energía por la interacción de los fenómenos físicos. La magnitud de estos va a depender del tiempo, generalmente si

es en horario diurno o nocturno, por ejemplo la radiación de longitud de onda corta es casi nula por las noche pero en un horario diurno alcanza sus máximos valores, en cambio la radiación de longitud de onda larga tiene predominancia en horario nocturno generando así la transferencia energía. La longitud de onda larga tiene diversas fuentes, una es radiación que emite la atmósfera hacia el suelo y otra la que emite el suelo hacia la atmósfera y a la vez esta va a depender fuertemente de las propiedades térmicas del suelo, como la emisividad y absorptividad. Dicho esto se necesita realizar un balance energético en la superficie, integrando los fenómenos físicos de transferencia de energía de conducción, convección y radiación como se muestra en la siguiente figura:

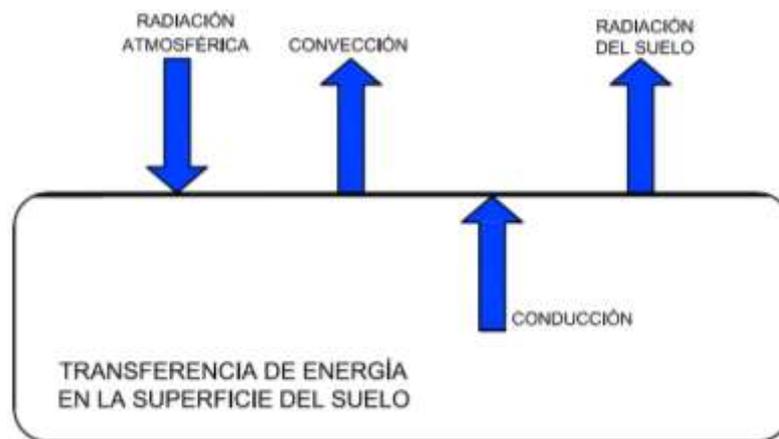


Figura 17. Balance energético ideal sobre la superficie del suelo para un horario nocturno

Fuente: Elaboración propia

Realizando el balance energético en la superficie se tiene:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{Radiación} & & \text{Energía} & & \text{Energía} & & \text{Radiación emitida} \\
 \text{atmosférica} & + & \text{ganada} & = & \text{perdida} & + & \text{por el suelo} \\
 \text{ganada} & & \text{por Conducción} & & \text{por Convección} & & \text{perdida}
 \end{array} \quad (35)$$

Las expresiones de transferencia de energía por conducción, convección y radiación emitida por el suelo tienen sustento en leyes científica probadas y que son explicadas en el capítulo de las bases teóricas:

Los fenómenos físicos descritos son descritos de manera matemática según:

Transferencia de energía por radiación atmosférica

$$\begin{array}{c}
 \text{Transferencia de energía} \\
 \text{por Radiación atmosférica}
 \end{array} = R_{in} * a \quad (36)$$

a =Absortividad propia del suelo

Transferencia de energía por conducción

$$\text{Transferencia de energía por Conducción} = -k \frac{dT}{dy} \quad (37)$$

Donde:

T = Es Temperatura, °C

y = Distancia de transferencia de energía por conducción, m

Transferencia de energía por convección

$$\text{Transferencia de energía por Convección} = h * (T - T_{\infty}) \quad (38)$$

h = Coeficiente de transferencia de energía por convección, $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

T_{∞} = Temperatura ambiente, °C

Transferencia de energía por radiación del suelo

$$\text{Transferencia de energía por Radiación del suelo} = R_{out} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (39)$$

σ = Constante de Boltzman, $5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

ε = Emisividad

Linealizando el término aplicando Serie de Taylor de 1er orden se tiene:

$$R_{out} = \varepsilon \sigma T^4 = 4\varepsilon \sigma T_o^4 + 4\varepsilon \sigma T_o^3 (T - T_o) \quad (40)$$

Reemplazando datos en la ec. 44

$$R_{out} = \varepsilon \sigma T^4 = 4\varepsilon \sigma T_o^4 + 4\varepsilon \sigma T_o^3 (T - T_o) \quad (41)$$

Se procederá a discretizar la ec. 45 en el dominio del tiempo y espacio, y para su entendimiento se realizó un sistema coordinado “Espacio-tiempo” para aproximar los valores de la temperatura en los dominios descritos, tal como se muestra en la Figura 18.

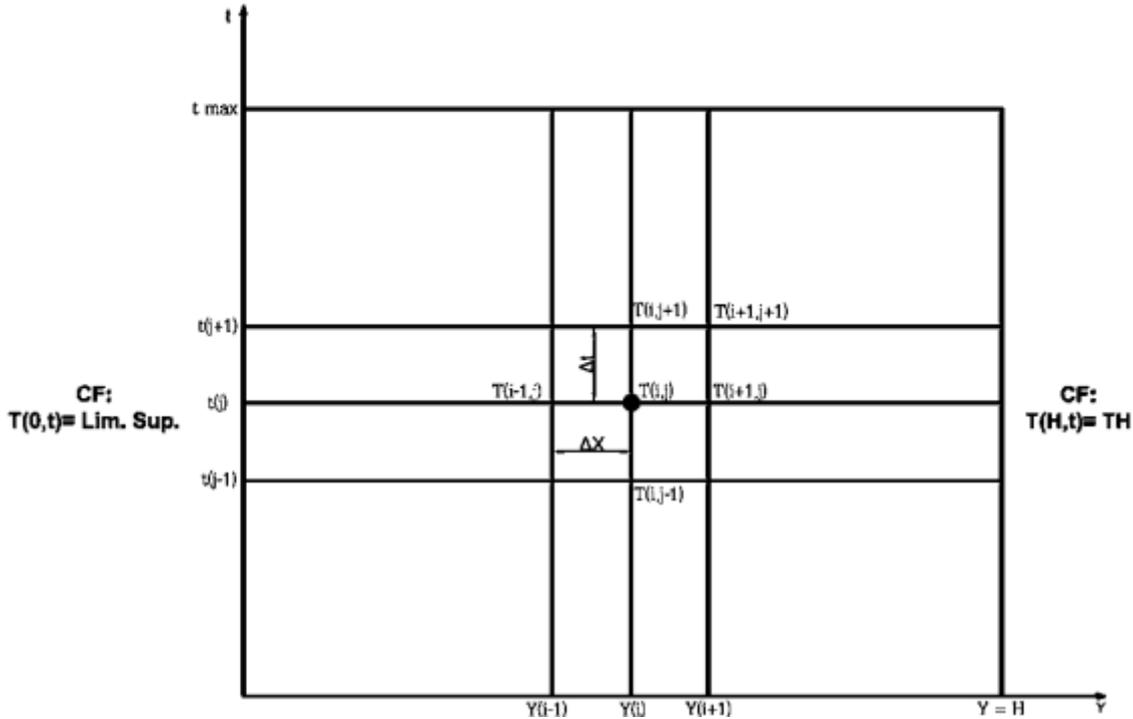


Figura 18. Representación de la malla en dominio discretizado

Fuente: Elaboración propia

Se debe tener en cuenta la diferencial de la temperatura en función al espacio con más puntos en función a 4 nodos:

$$\frac{dT_i}{dy} = \frac{2T_{i+1,j} + 3T_{i,j} - T_{i-1,j} + T_{i-2,j}}{6\Delta y} \quad (42)$$

Reemplazando y Discretizando de forma adecuada en la ec. 46 se obtiene:

$$aR_{in} - k \frac{2T_{3,j} + 3T_{2,j} - T_{1,j} + T_{0,j}}{6\Delta y} = \varepsilon\sigma T_o^4 + 4\varepsilon\sigma T_o^3(T_{2,j} - T_o) + h(T_{2,j} - T_\infty) \quad (43)$$

Despejando T_i de la ec. 47

$$T_{0,j} = \frac{6\Delta y(\varepsilon\sigma T_o^4 + 4\varepsilon\sigma T_o^3(T_{2,j} - T_o) + h(T_{2,j} - T_\infty) - aR_{in})}{-k} - (2T_{3,j} - 3T_{2,j} + T_{1,j}) \quad (44)$$

Simplificando términos y factorizando:

$$T_{0,j} = -6\Delta y \frac{\varepsilon\sigma T_o^3(4T_{2,j} - 3T_o) + h * (T_{2,j} - T_\infty) - aR_{in}}{k} - (2T_{3,j} - 3T_{2,j} + T_{1,j}) \quad (45)$$

El nodo $T_{0,j}$ describe la Temperatura superficie que se obtiene través del balance energético con los fenómenos descritos anteriormente. Esto se realizó en dominio temporal y espacial.

1.2.14. Instrumentos de medición

Pirgeómetros: Es un dispositivo que sirve para medir el espectro de la radiación electromagnética infrarroja en la atmosfera, que comúnmente se denomina radiación de onda larga. El rango de medición en el espectro electromagnético es generalmente de 4500 a 42000 nm.

Piranómetro: También denominado solarímetro, es un instrumento utilizado para medir la radiación solar incidente en un rango en el espectro electromagnético aproximado de 285 a 3000 nm

Tensiómetro: Es un instrumento de medición diferentes profundidades del suelo. Generalmente mide temperatura, contenido volumétrico de agua y conductividad. Los sensores están conectados a un data logger para su registro y distribución de datos.

Radiómetro infrarrojo: Es un sensor de temperatura infrarrojo para superficies midiendo la energía térmica radiada desde cualquier superficie dentro de su campo de visión.

1.3. Marco conceptual

Modelo matemático.- Para Himmelblau & Bischoff (2004) es una representación significativa de un proceso real con simbología matemática que sirve para el entendimiento y manipulación de procesos complejos.

Transferencia de Energía.- Es el proceso de transmisión de energía en distintos ámbitos siempre y cuando se produzca o exista un gradiente térmico o cuando dos sistemas de temperaturas diferentes entran en contacto

Estaciones climáticas.- Son temporadas propias del año en donde las condiciones climáticas y meteorológicas que predominan se mantienen relativamente constantes en una región, y en un cierto rango. Estos periodos son cuatro y duran aproximadamente tres meses: primavera, verano, otoño e invierno.

Textura del suelo.- Es un indicador del contenido relativo de partículas de diferente tamaño. Se pueden distinguir 3 tipos de partículas: Arena, arcilla y limo.

Validación experimental.- Según Medina, Vargas, Navarro, Canul, & Peraza, (2010) es una serie de pruebas estadísticas entre datos simulados y observados, con el fin de evaluar la capacidad de contrastación de estos.

Radiación solar.- Es la aglomeración de radiaciones electromagnéticas emitidas por reacciones de fusión nuclear que ocurren en el sol. La temperatura media es de 6000 K y el lugar donde principalmente ocurre la reacción de fusión es en el núcleo del sol el cual experimenta una pérdida de masa que se transforma en energía.

Sistema dinámico.- Es un sistema que posee una evolución de una o más variables con respecto al tiempo. Un ejemplo común de estos sistemas son los procesos físicos pero también existen en diversos campos como en los modelos económicos, matemáticos y de otros tipos que también vienen a ser sistemas dinámicos.

CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

- Balde de plástico, 5-10 L.
- Manguera, 150 m.
- Cilindro rotulado, 150 L.
- Estacas de Fierro, 30 cm.

2.2. Equipos e instrumentos

Los equipos e instrumentos utilizados se encuentran ubicados en el Observatorio del Huayao, perteneciente al IGP. La frecuencia de medición de la mayoría de ellos es de 1 min, que son registrados mediante un Data Logger. Los usados fueron:

- **Pirgeómetro**, de marca CAMPBELL tienen una precisión de 0.1% del rango total.
- **Piranómetro**, de marca KIPP & ZONEN que tiene una sensibilidad de 5 a 15 $(\mu V/W)/m^2$.
- **Radiómetro Infrarrojo**, de marca APOGEE que cuenta con una sensibilidad de +- 0.02°C.
- **Tensiómetros**, que son sensores de temperatura y humedad del suelo (Tensiómetros) de marca DECAGON que tiene una precisión de +-3% para humedad de suelo y +- 1°C para temperatura
- **Termo higrómetros**, de marca CAMPBELL que posee una precisión de 0.023 % y de 0.15 °C para humedad relativa y temperatura respectivamente
- **Anemómetro ultrasónico**, de marca SUTRON con precisión de 0.45 m/s
- **Data Logger**, cuya función principal es la de registrar los datos medidos por los instrumentos.

Para la parte computacional se utilizó una Laptop Intel Core i3 de 1.8 GHz que cuenta con memoria RAM de 4.00 GB y disco duro de 700 GB.

2.3. Procedimiento

Procedimiento para recolección de datos para la investigación:

- Los instrumentos que posee el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el observatorio de Huayao, se tuvieron que modificar sus ubicaciones a fin que se incorporen en la parcela experimental para realizar las mediciones correspondientes.

- Se aplicó la técnica del riego pasivo a diferentes alturas de agua: 5, 10, 20, 25, 35, 50 mm
- Se registró los datos de todas las variables requeridas por medio de un Data Logger a frecuencia de 1 min por registro menos los tensiómetros, los cuales están a 5 min.

El procedimiento para la investigación fue el siguiente:

- Se desarrolló modelo numérico a partir del balance energético en la superficie de la tierra, con el fin de simular la temperatura de superficie.
- Se programó el modelo matemático desarrollado, en el lenguaje de programación MatLab 8.3. , insertando datos de revisiones bibliográficas de absorptividad, emisividad del suelo y otros.
- Se simuló el modelo matemático desarrollado.
- Se validó el modelo numérico desarrollado con aplicando estadísticos propios para este, en días de helada del año 2016, específicamente en para los meses junio, julio y agosto en los cuales existe mayor frecuencia del fenómeno de las heladas.
- Se realizó las experimentaciones en el espacio destinado a esta.
- Usando el modelo elaborado, se analizó los datos para obtener el incremento de temperatura con diferentes volúmenes de agua aplicados por la técnica del riego.

2.4. Límites de la investigación

La investigación se desarrolló en el Observatorio del Huayao, perteneciente al Instituto Geofísico del Perú (IGP). El observatorio pertenece al departamento de Junín, provincia de Chupaca, distrito de Huachac, muy cercano a la población del Huayao.

Sus coordenadas geográficas corresponden a 12° 02' 26.59'' S 75° 19' 14.11'' O donde fue fundado el primero de marzo de 1922.



Figura 19. Límites de la investigación.
Fuente: Elaboración Propia

El periodo que comprende las experimentaciones estuvo entre junio a setiembre del año 2017.

Se desarrolló un modelo numérico a través de un balance energético en la superficie de la tierra, seguido de su validación experimental para determinar la calidad de contrastación del modelo matemático.

2.5. Población y muestra

La población y muestra de la presente investigación vienen a ser las 6 experimentaciones realizadas, de las cuales se tiene un registro por día a frecuencia de registro de 1 minuto. Los días seleccionados para las experimentaciones son días típicos que se presenta el fenómeno de las heladas.

2.6. Técnica de procesamiento y análisis de datos

En la presente investigación se usó principalmente estadística descriptiva. Para la validación del modelo elaborado se usó gráficas de comparación y medidas de dispersión y desviación como: MEF (eficiencia de Modelado), CD (Coeficiente de determinación), C (Coeficiente de error).

2.7. Diseño de la investigación

Para el presente trabajo de investigación se propuso un diseño cuasi-experimental, lo que permitió evaluar las variables del proceso así como su interrelación.

Se realizó 6 experimentos en una parcela experimental de 4m², en donde se encuentran instalados los instrumentos necesarios para la investigación, los periodos de medición fueron

de 12 horas, iniciando a las 19:00 h y finalizando a las 07:00 h del día posterior. Se registraron la temperatura de superficie, radiación de onda larga entrante al sistema, el perfil de temperatura del suelo hasta los 50cm de profundidad, humedad del suelo, velocidad del viento, temperatura ambiente y la nubosidad presente. Todos los datos son registrados con una frecuencia de 1 min a excepción del perfil de temperatura y la humedad, los cuales están a frecuencia de 5 min.

Los experimentos se llevaron a cabo en el periodo típico de heladas en el Valle del Mantaro, a excepción del último experimento que se llevó a cabo en setiembre por diversos motivos que son explicados a continuación. El periodo típico de heladas es aquel en el que se registran las temperaturas mínimas para un año, y por consecuencia, en el que existe mayor frecuencia de heladas. En el Valle del Mantaro el periodo de heladas fueron estudiados por Trasmonte & Enciso (2012) y contrastados en la presente investigación. Este periodo abarca los meses de junio, julio y agosto que concuerda con la estación de invierno.

Las variables de investigación son:

Variable independiente:

- Altura de agua aplicada para la técnica del riego, mm

Variable dependiente:

- Temperatura mínima de superficie, °C

La fecha y los diferentes valores de la variable independiente son mostradas en la Tabla 12.

Tabla 12

Diseño experimental

NÚMERO DE EXPERIMENTO	FECHA DE APLICACIÓN	HORA DE APLICACIÓN	ALTURA DE AGUA APLICADA, MM	VOLUMEN DE AGUA SEGÚN ÁREA DE PARCELA EXPERIMENTAL, L
1	05/06/2017	12:10 pm	5	20
2	13/06/2017	9:32 am	10	40
3	20/06/2017	9:38 am	20	80
4	10/07/2017	9:40 am	25	100
5	19/07/2017	10:20 am	35	140
6	05/09/2017	9:35 am	50	200

Fuente: Elaboración Propia

Como ejemplo en la primera experimentación se dio a cabo el día 05/06/2017, y se aplicó la técnica del riego pasivo con 5 mm de altura de agua, el cual al ser multiplicada por el área del suelo se calcula el volumen de agua que se debe aplicar. El área de la parcela experimental es de 4 m² lo que implica para este experimento un uso de 20 litros de agua.

Cabe resaltar que la elección del área se hizo bajo un análisis sobre los efectos que pueden tener los bordes de la parcela sobre la variable a medir, el denominado “Efecto borde”, que según Castro & Morejón (2013) este tiene un efecto hasta los 30 cm de distancia entre los borde al centro de la parcela, y al tomar 2 metros de lado se estaría mitigando el efecto borde sobre las variables a medir.

El riego usado para la aplicación de la técnica, es la que comúnmente se usa en todo el Valle del Mantaro, el riego por gravedad, que es el método tradicional de riego con un flujo de agua continuo en los terrenos agrícolas.

CAPITULO III

TRATAMIENTO DE DATOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

3.1. Presentación de mediciones

Como se muestra en la Tabla 12 se realizaron 6 experimentaciones en la parcela experimental, el horario de aplicación de la técnica del riego pasivo fue en las mañanas tal como lo recomienda Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2010). El periodo de mediciones de variables atmosféricas importantes para la investigación fue en el horario de 19:00h a 07:00h del día posterior a frecuencia de 1 min. De igual forma se observó el comportamiento de la humedad del suelo a 10 cm bajo superficie para en el periodo de 00:00h a 23:59h para los días de aplicación de la técnica del riego pasivo. 3 de las experimentaciones corresponden al mes de junio, 2 al mes de julio y 1 al mes de setiembre.

Las mediciones se mostrarán las diversas variables para 2 días de experimentaciones en forma de gráficas y luego se mostrará un resumen de todas las experimentaciones.

Experimento N° 1

Se muestran el comportamiento de las variables que se consideran importante para el análisis del balance energético, ya que presentan una influencia en la temperatura de superficie y a la vez son variables de entradas en el modelo numérico elaborado.

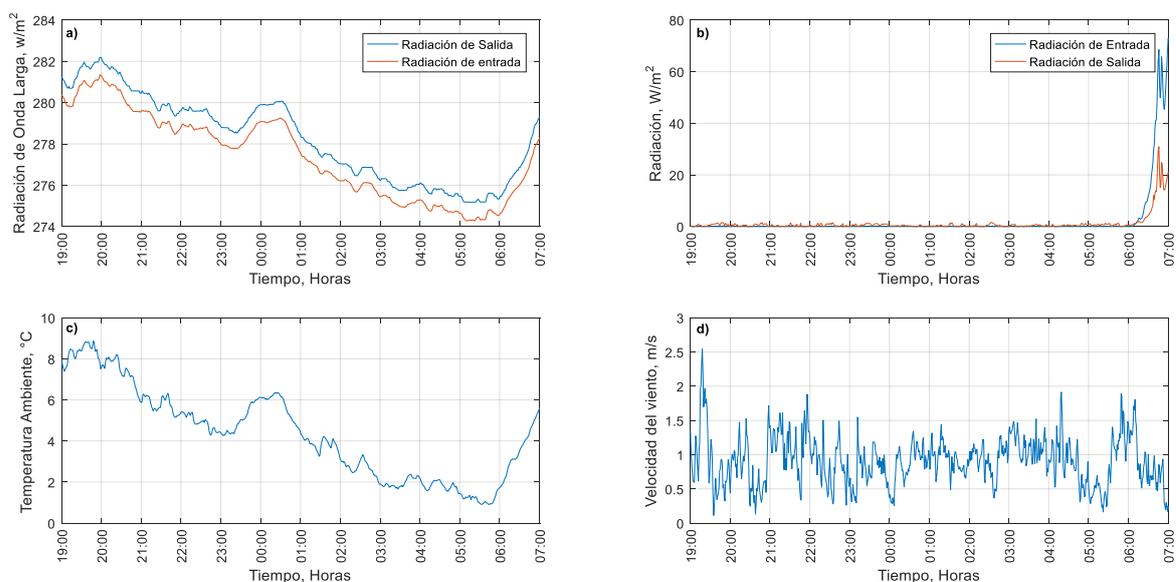


Figura 20. Comportamiento de variables meteorológicas medidas, a) Radiación de Onda larga, b) Radiación de Onda corta, c) Temperatura ambiente, d) Velocidad de viento.

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica mostrada, se midieron: a) Radiación de onda larga de entrada y salida
 b) Onda corta de entrada y salida c) Temperatura ambiente d) Velocidad del viento.

De igual forma se midió la humedad del suelo a 10 cm de profundidad, el horario de aplicación de la técnica del riego pasivo se muestra en la Tabla 12 y su comportamiento se muestra en la siguiente gráfica.

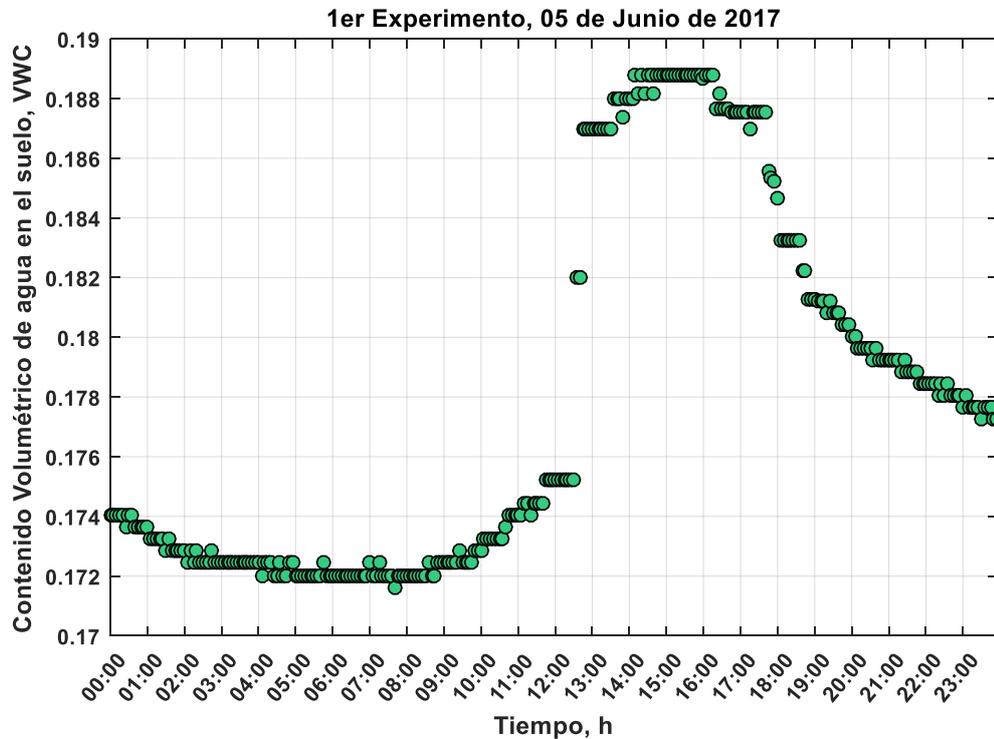


Figura 21. Comportamiento del contenido volumétrico de agua en el suelo, primer experimento - 05/06/2017 de 00:00 h a 23:59 h.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 21 se observa que la humedad aumenta hasta llegar a un pico de 0.1884 de contenido volumétrico de agua en el suelo aproximadamente a las 15:00 h para luego descender hasta un contenido volumétrico de agua de 0.1768

Experimentación N° 2

El segundo experimento se realizó el día 13 de Julio de 2017, la altura de agua usada es fue de 10 mm. Se aplicó a la misma parcela experimental de 4m² haciendo que se use para la técnica 40 litros de agua. Se inició a las 09:30 h.

El comportamiento de las variables son de influencia directa con la temperatura de superficie es mostrada en la siguiente gráfica

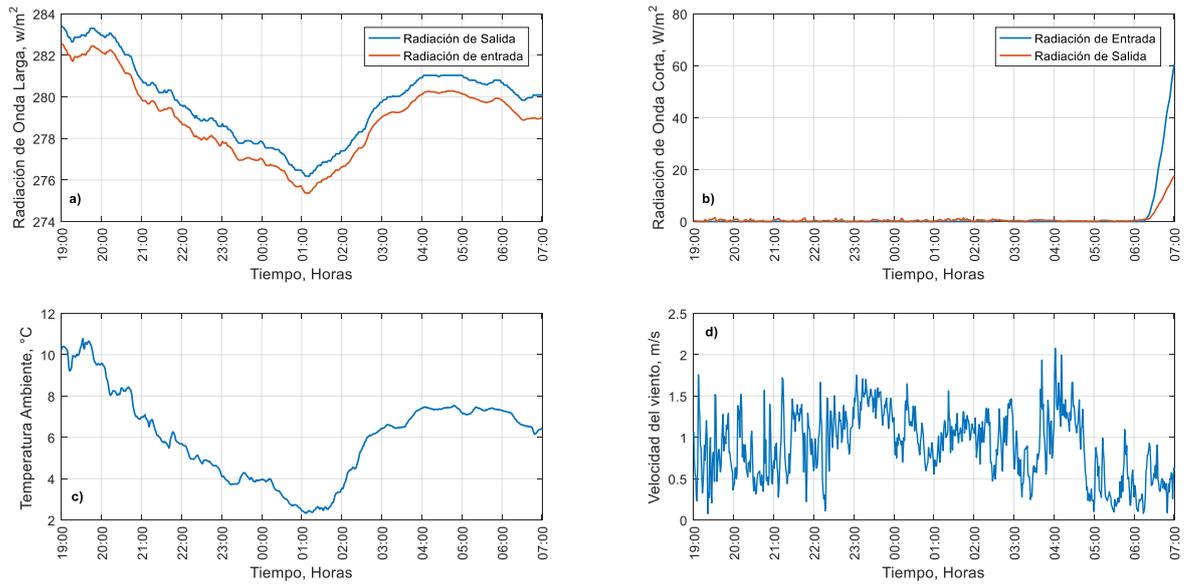


Figura 22. Comportamiento de variables meteorológicas medidas, a) Radiación de Onda larga, b) Radiación de Onda corta, c) Temperatura ambiente, d) Velocidad de viento.

Fuente: Elaboración propia

De la Figura 22 Se observa el comportamiento de a) Radiación de onda larga de entrada y salida b) Onda corta de entrada y salida del sistema c) Temperatura ambiente y d) Velocidad del viento.

El comportamiento que tuvo el contenido de agua en el suelo para el segundo experimento se muestra en la siguiente gráfica.

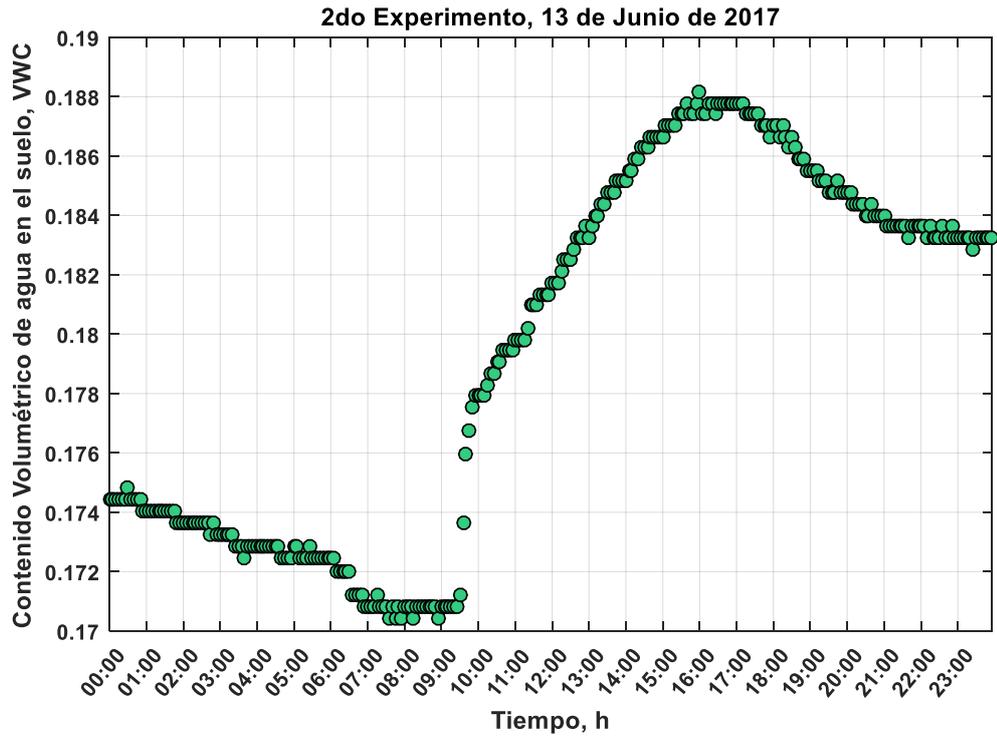


Figura 23. Comportamiento del contenido volumétrico de agua en el suelo, Segundo experimento- 13/06/2017 de 00:00 h a 23:59 h.
 Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se observa que la humedad aumenta hasta llegar a un pico de 0.1881 de contenido volumétrico de agua en el suelo aproximadamente entre las 16:00 h a 17:00 h para luego descender hasta un contenido volumétrico de agua de 0.1831.

A continuación se muestran las gráficas de las experimentaciones restantes sobre el comportamiento del contenido volumétrico de agua en el suelo.

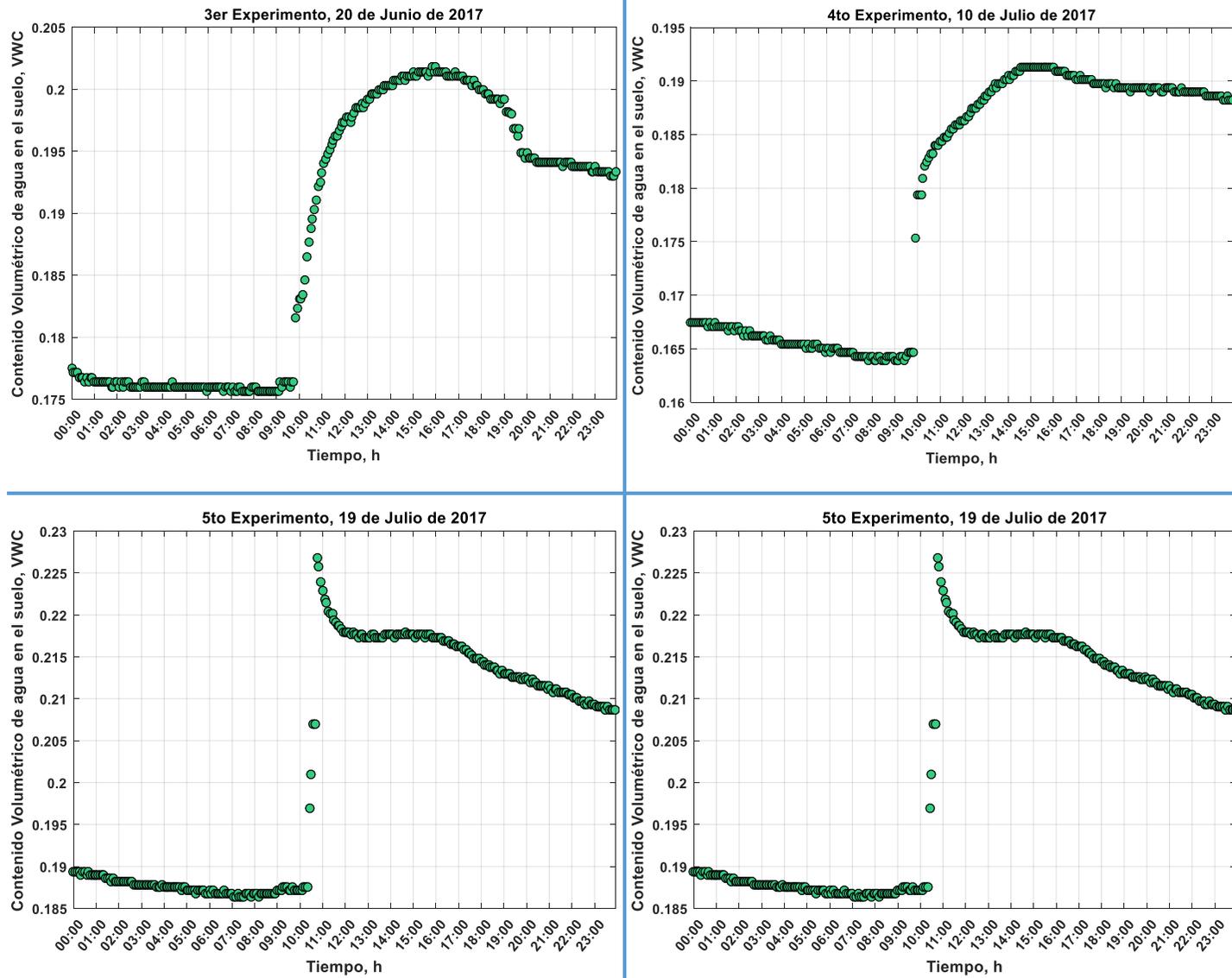


Figura 24. Comportamiento del contenido volumétrico de agua en el suelo en los experimentos 3er, 4to, 5to y 6to, realizados en el contexto de la presente investigación. Fuente: Elaboración Propia

3.2. Validación de modelo elaborado

El diseño del modelo contempla un horario fijo, el cual está directamente ligado con la presencia del fenómeno de las heladas. Generalmente debido a la ausencia de radiación solar. Este horario es de rango de 03:00 h a 06:00 h. El periodo elegido para el diseño del modelo es desde las 19:00h hasta las 06:00h del día siguiente, ya que seguido a las 6:00 am existe presencia de radiación solar, el cual eleva la temperatura de la superficie de la tierra.

El tipo de suelo propio de la parcela experimental es de textura franco arcilloso arenoso según el estudio de Garay & Ochoa (2010). Y como se explicó anteriormente este tipo de suelo es el predominante en el Valle del Mantaro. Las características del tipo de suelo van a ser un factor importante en el balance de energía en la superficie a través de sus propiedades físicas y térmicas las cuales están en función a la humedad del suelo.

Geiger (1995) Realizó un estudio del comportamiento de las propiedades térmicas de un suelo arcilloso en función a la humedad de este, hizo una tabla con los siguientes valores:

Tabla 13
Comportamiento de Propiedades térmicas del suelo en función al contenido volumétrico de agua en el suelo.

Contenido de Agua	%, $\frac{m^3}{m^3}$	0	10	20	30	40
Capacidad Térmica	$\frac{W}{mK}$	0.25	1.00	1.50	1.68	1.08
Conductividad Térmica	$10^{-6} \frac{J}{m^3K}$	1.25	1.67	2.09	2.51	2.93

Fuente: (Geiger, 1995, p.528)

Graficando los datos de la tabla anterior, se puede observar el comportamiento de la conductividad térmica y la capacidad calorífica en función al contenido de agua en el suelo.

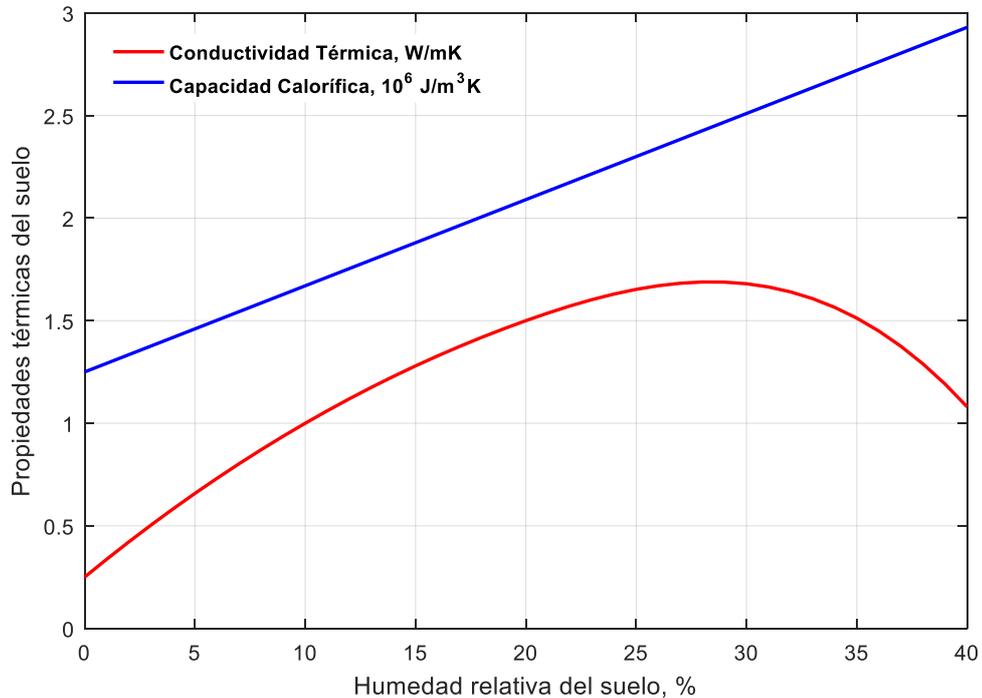


Figura 25. Comportamiento gráfico de las propiedades térmicas del suelo en función al contenido volumétrico de agua.

Fuente: Adaptado de (Geiger, 1995, p. 528)

Otro factor importante es el comportamiento del albedo en función a la humedad del suelo. Idso, Jackson, & Reginato (1975) estudiaron este comportamiento que presenta en la Figura 26.

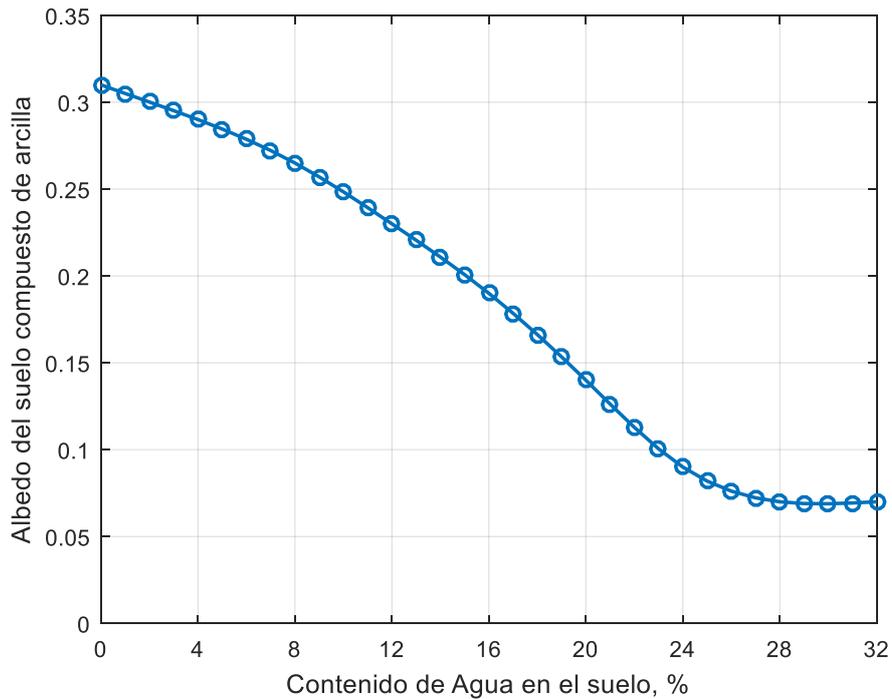


Figura 26. Comportamiento del albedo en función al contenido de agua en el suelo.

Fuente: Adaptado de Idso, Jackson, & Reginato (1975)

El análisis de discretización espacial y temporal se realizó con un paso de tiempo de 1 min y paso de espacio de 1cm, tomado desde la superficie hasta 50 cm de profundidad, en donde la temperatura es constante.

A partir de los datos de los tensiómetros instalados en el Observatorio del Huayao, en la parcela experimental, se pueden obtener los perfiles de temperatura para diferentes horarios, se elaboró una gráfica en donde se muestra la variación del perfil de temperatura con frecuencia de 3 horas para el día 06 de junio de 2017, un día típico de helada.

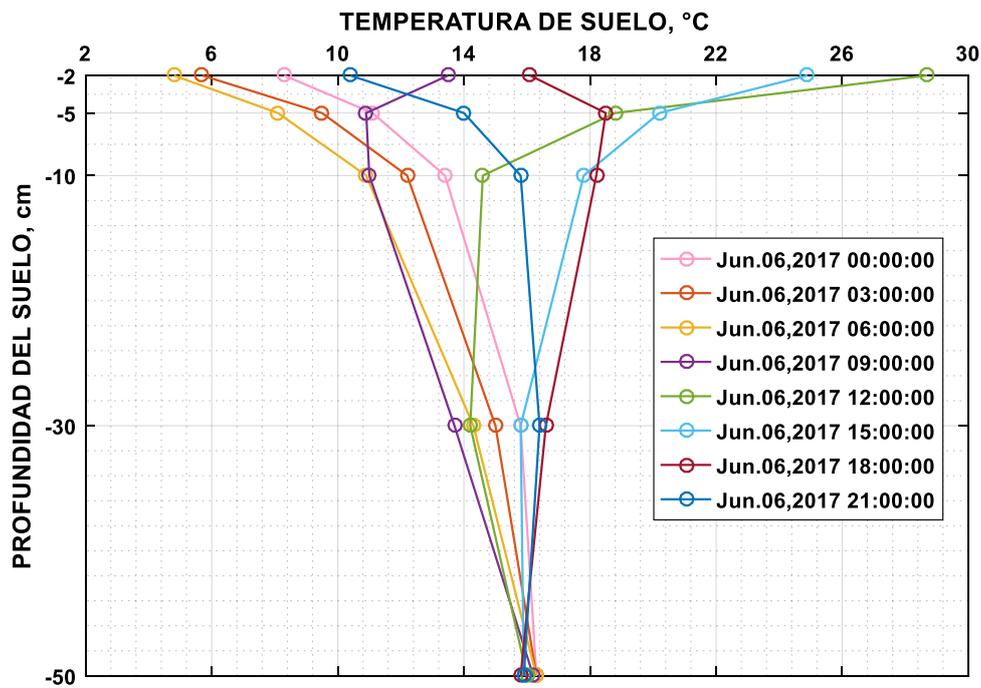
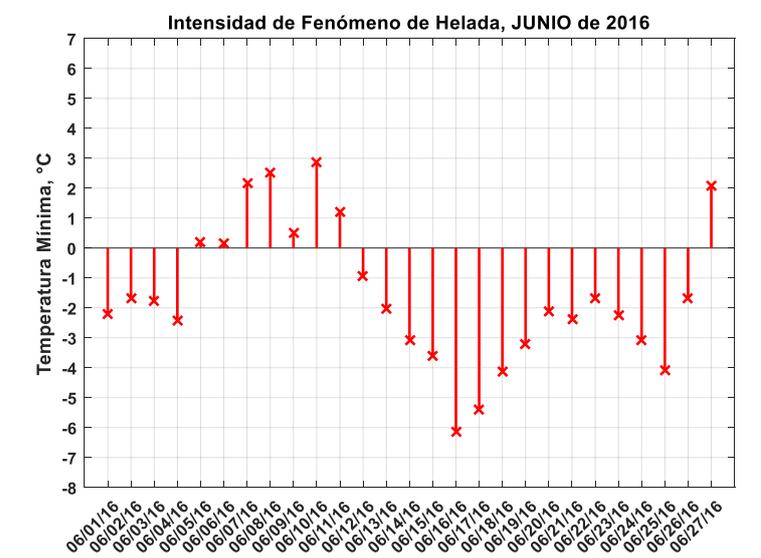


Figura 27. Comportamiento del perfil de temperaturas en el suelo en día típico de helada 06/06/2017 para rango de 2 – 50 cm de profundidad.

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la figura, existe una fuerte variación de temperatura a 2 cm de profundidad y esta va disminuyendo a mayor profundidad, es así que al llegar a los 50 cm la temperatura se puede considerar constante para todo un día.

En cuanto a la validación del modelo, se escogió los días de helada del año 2016 los cuales están en función a la intensidad del fenómeno, es decir, a la temperatura mínima de superficie para los días de los meses junio, julio y agosto. En el análisis existieron días de los cuales no se cuenta con la información de temperatura mínima de superficie.



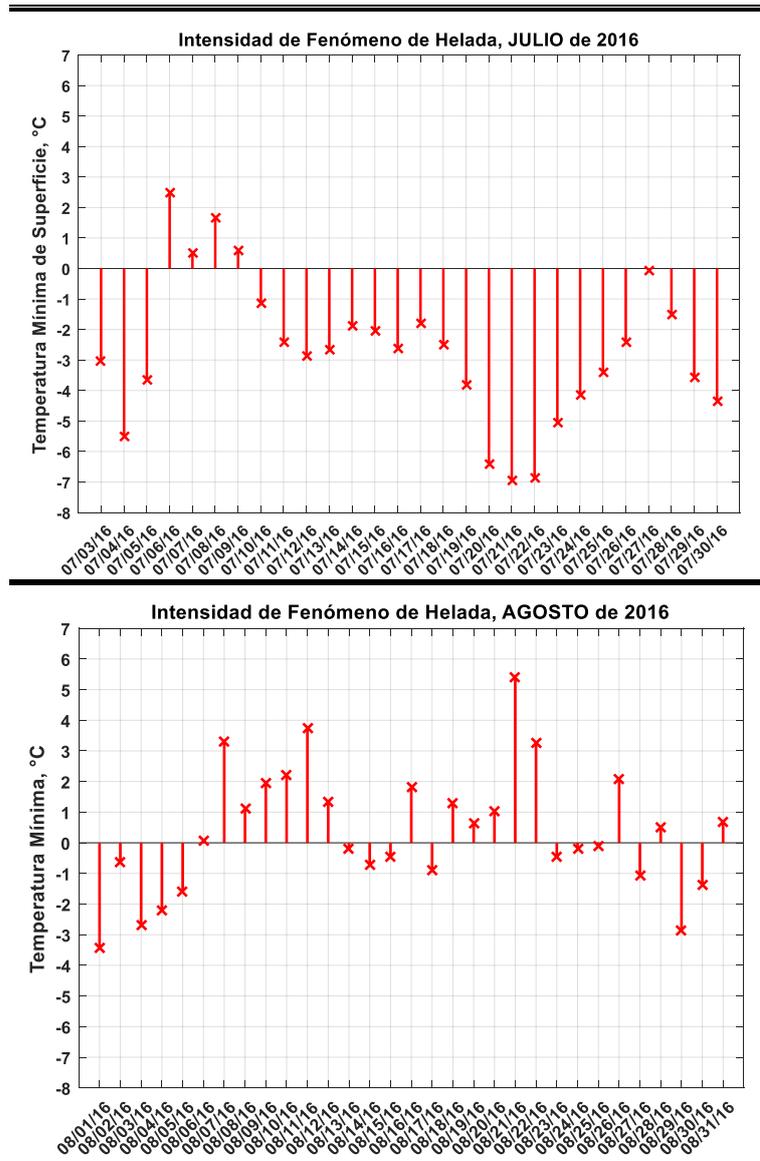


Figura 28. Temperaturas mínimas de superficie a nivel diario en periodo de junio – agosto de 2016.

Fuente: Elaboración Propia

Se aplicó el modelo para cada una de las fechas de los gráficos mostrados anteriormente y se aplicó los estadísticos de validación: R de Pearson (r), eficiencia de modelado (MEF), coeficiente de determinación de modelo (CD), coeficiente de error (C) cuyas ec. son (28), (29), (30).

Para un ajuste perfecto los valores de MEF, CD y r valen 1, mientras que para C el valor ideal debe ser de 0.

Se puso a prueba el modelo, comparándolo con observaciones de temperatura de superficie, se realizó gráficos de comparación y de dispersión para su mejor entendimiento, se muestran a continuación se muestra un ejemplo para el día 19 de julio de 2016:

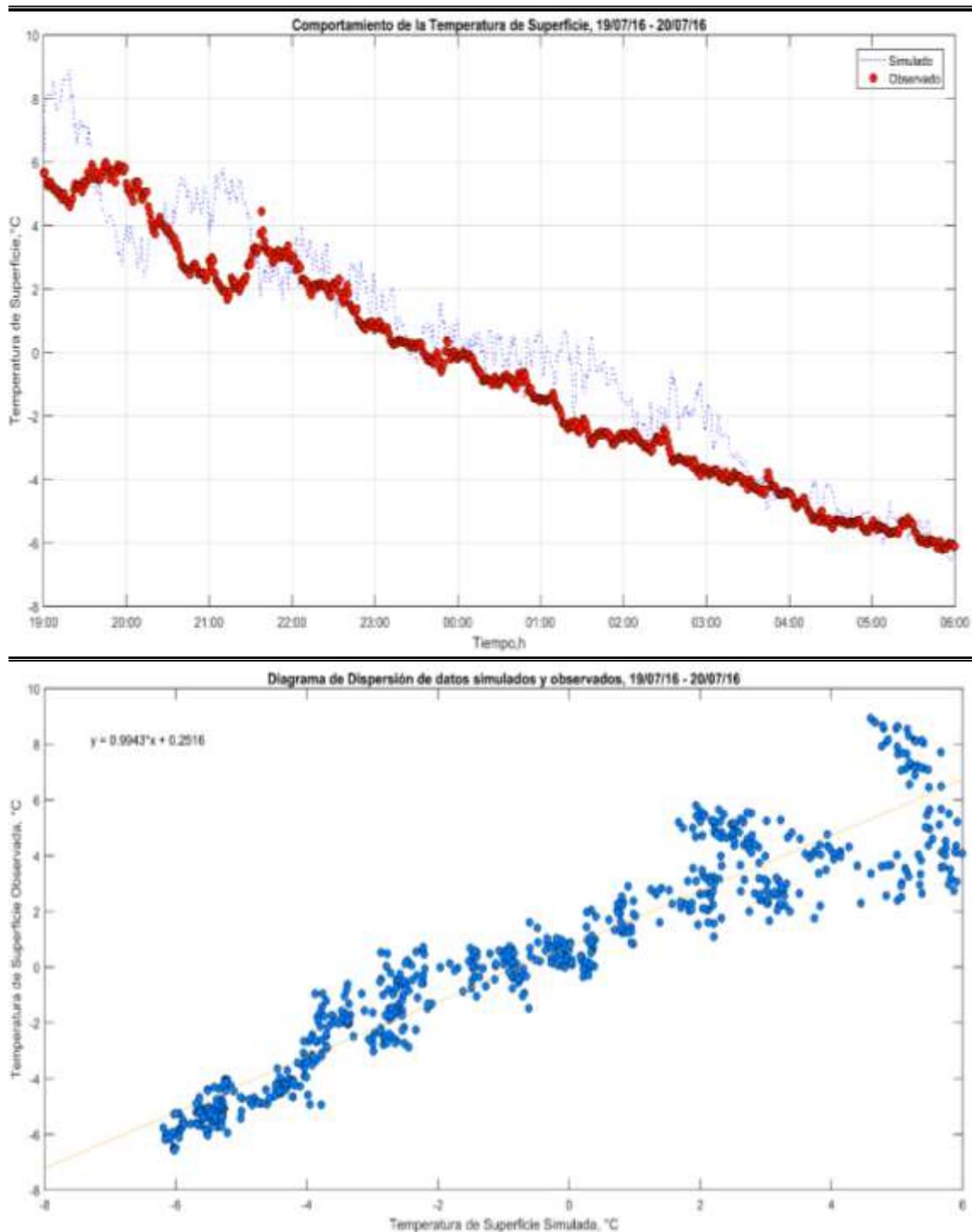


Figura 29. a) Comparación entre datos observados y simulados de la temperatura de superficie para el periodo 19/06-20/06 de 2016, b) Diagrama de dispersión de datos simulados y observados para el periodo 19/06-20/06 de 2016.

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se muestran los estadísticos de validación aplicados para los meses de junio, julio y agosto.

Tabla 14

Validación de modelo elaborado para días del periodo junio-agosto de 2016.

FECHA	MEF	R	CD	C	VALIDEZ
01/06/2016	0.868	0.958	0.817	0.055	SI
02/06/2016	0.831	1.204	0.621	0.138	SI
03/06/2016	0.849	1.216	0.592	0.130	SI
04/06/2016	-2.895	1.339	0.177	1.062	NO
05/06/2016	0.647	1.163	0.637	0.377	SI
06/06/2016	-2.454	0.707	0.853	0.909	NO
07/06/2016	0.709	0.708	0.994	0.185	SI
08/06/2016	0.046	0.320	0.578	0.131	NO
09/06/2016	0.696	0.775	1.166	0.154	SI
10/06/2016	0.717	0.731	1.242	0.160	SI
11/06/2016	0.436	1.518	0.338	0.260	SI
12/06/2016	0.269	1.552	0.297	0.802	SI
13/06/2016	0.747	1.382	0.478	0.429	SI
14/06/2016	0.451	1.490	0.384	19.816	NO
15/06/2016	0.242	1.206	0.290	0.236	SI
16/06/2016	0.463	1.229	0.402	0.184	SI
17/06/2016	-0.633	1.998	0.204	-3.944	NO
18/06/2016	0.854	1.082	0.671	0.327	SI
19/06/2016	-0.705	1.943	0.212	8.515	NO
08/07/2016	-0.101	0.163	6.839	0.520	NO
09/07/2016	0.815	0.399	0.926	0.287	SI
10/07/2016	0.888	1.132	0.677	0.167	SI
11/07/2016	0.878	1.243	0.607	0.575	SI
12/07/2016	0.770	1.405	0.455	0.593	SI
13/07/2016	0.959	1.029	0.835	0.332	SI
14/07/2016	0.939	0.931	1.041	0.262	SI
15/07/2016	0.772	1.378	0.482	0.668	SI
16/07/2016	0.281	1.242	0.401	0.495	SI
17/07/2016	0.761	1.395	0.471	0.612	SI
18/07/2016	0.707	1.464	0.434	0.200	SI
19/07/2016	0.936	0.994	0.872	0.673	SI
20/07/2016	0.794	1.243	0.573	0.725	SI
21/07/2016	0.874	1.168	0.630	0.745	SI

22/07/2016	0.885	1.225	0.612	0.307	SI
23/07/2016	0.618	1.515	0.402	4.252	NO
24/07/2016	0.826	1.238	0.566	0.196	SI
25/07/2016	0.944	0.827	1.094	0.151	SI
26/07/2016	0.655	0.668	1.235	0.385	SI
27/07/2016	0.758	0.582	0.895	0.449	SI
28/07/2016	0.783	0.886	0.852	0.395	SI
29/07/2016	0.629	1.257	0.515	2.999	NO
30/07/2016	0.700	1.192	0.570	0.286	SI
01/08/2016	-0.565	0.457	0.713	0.684	NO
02/08/2016	0.927	0.841	1.221	0.101	SI
03/08/2016	0.911	0.859	1.134	0.188	SI
04/08/2016	0.917	0.752	0.917	0.092	SI
05/08/2016	0.280	0.362	1.706	0.568	NO
06/08/2016	0.882	0.988	0.911	0.106	SI
07/08/2016	0.856	0.652	0.960	0.307	SI
08/08/2016	0.642	0.848	0.721	0.198	SI
09/08/2016	0.498	0.314	3.772	0.243	SI
10/08/2016	0.464	0.809	0.657	0.098	SI
11/08/2016	0.222	0.212	3.380	0.383	NO
12/08/2016	0.581	0.337	4.361	0.407	NO
13/08/2016	0.730	0.882	0.191	0.413	SI
14/08/2016	0.862	0.624	1.081	0.304	SI
15/08/2016	0.208	0.496	1.421	0.382	NO
16/08/2016	0.776	0.602	1.226	0.339	SI
17/08/2016	0.798	0.733	0.689	0.380	SI
18/08/2016	0.836	0.760	1.411	0.201	SI
19/08/2016	0.264	0.954	0.604	0.264	SI
20/08/2016	0.326	0.634	0.943	0.085	SI
21/08/2016	-2.650	0.117	0.341	0.182	NO
22/08/2016	0.927	0.901	1.039	0.261	SI
23/08/2016	-0.057	0.451	0.733	0.454	NO
24/08/2016	0.708	0.804	1.074	0.440	SI
25/08/2016	0.803	0.475	1.200	0.235	SI
26/08/2016	0.851	0.821	1.200	0.507	SI

27/08/2016	0.516	0.893	0.781	0.311	SI
28/08/2016	0.883	0.811	1.300	0.414	SI
30/08/2016	0.816	0.571	2.369	0.289	NO

Fuente: Elaboración propia

Según lo mostrado en la Tabla 14, el indicador de eficiencia de modelado (MEF) del total de pruebas, 8 resultan ser negativas y el resto son positivas y cercanas a 1 lo que según Medina, Vargas, Navarro, Canul, & Peraza (2010) indica que los valores simulados son próximos a los valores observados. Para el caso del indicador r de Pearson (r) se observa que existen 43 pruebas que presentan valores en el rango de 0 a 1 lo cual indica que existe una correlación positiva entre datos observados y simulados, lo cual indica que hay una correlación. En cuanto al indicador de Coeficiente de Determinación (CD), se observa que 22 valores son mayores que 1 y el resto son menores, lo que indica que 22 valores sobre predicen los valores observados y el resto posee una baja predicción. En relación al Coeficiente de Error (C) se observa que 17 pruebas tienen un valor mayor que 0.5 y el resto muy cercano a 0, lo que indica que el modelo predice convenientemente. A partir de esto, se concluye que de las 71 pruebas con el modelo, la gran mayoría presenta una buena contrastación entre valores simulados y observados.

3.3. Resultados

La variable del contenido volumétrico de agua en suelo tiene una variación en función a la profundidad, por este motivo es que se realizó un análisis que implica principalmente en determinar a qué profundidad esta variable en el suelo se ajuste mejor con el modelo elaborado, es así que se hizo corridas aplicando los parámetros establecidos como emisividad, absortividad, etc. con los datos de contenido volumétrico de agua en el suelo a diferentes profundidades y comparar gráficamente con la temperatura de superficie observada. Los datos fueron tomados para el día 19/07/2016 cuyos valores de VWC a diferentes profundidades son:

Tabla 15
Perfil de VWC en el suelo para el día 19/07/2016

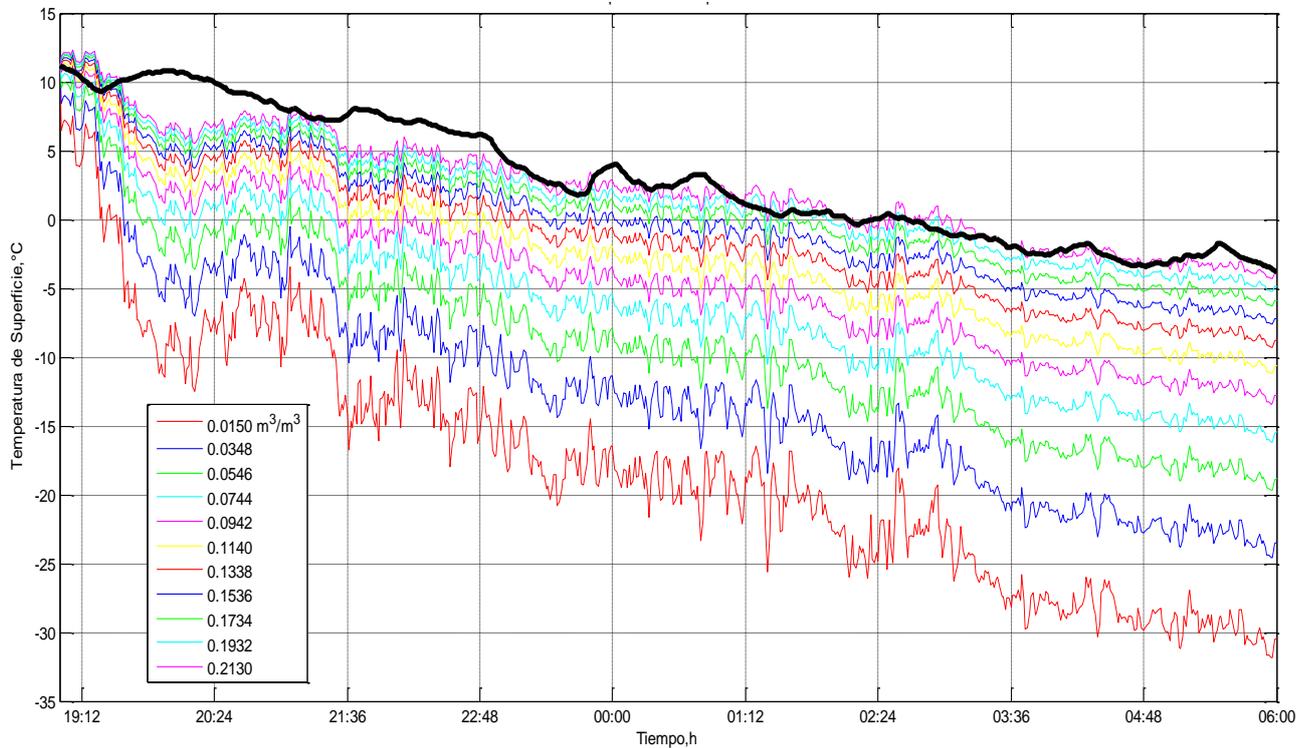
<i>Profundidad del suelo</i>	50cm	30cm	10cm	5cm	2cm
<i>Contenido volumétrico de agua en el suelo, m³/ m³</i>	0.074	0.191	0.213	0.036	0.015

Fuente: Elaboración Propia

De estos valores se puede observar que existe un mayor contenido de VWC a los 10 cm de profundidad y un menor a 2 cm con un valor de 0.015.

Se elaboró una lista que contiene desde el menor valor (0.015) hasta el mayor valor VWC (0.213) y se estableció un paso de 0.0198 obteniendo así una lista con 11 valores.

El modelo se corrió con cada uno de estos de con el objetivo de observar gráficamente que valor da salida de temperatura de superficie que se ajusten más con los datos observados.



**La línea de color negro son de valores observados.*

Figura 30. Comportamiento de las salidas del modelo frente a variaciones de contenido volumétrico de agua en el suelo.

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la Figura 30 la línea de los valores observados tiene un mayor ajuste con la mayor humedad que es el valor de 0.2130 que cuya posición es de 10 cm de profundidad. Añadiendo a esto se obtuvo información sobre los horizontes genéticos propias del tipo textura de la parcela experimental. Zavala & Salgado (2013) mencionan que existe hay una abundancia de materia orgánica en los primero 15 cm de profundidad aproximadamente, y que generalmente para el suelo franco arcilloso arenoso, los primeros 1-5cm está compuesto por un mayor porcentaje de arena que de arcilla y que para el siguiente tramo, de 5-15 cm está compuesto por suelo de textura arcillosa con mayor porosidad que el primer tramo. El suelo al presentar mayor porosidad, tiene mejor capacidad de retención de agua, entonces podríamos suponer que la transferencia de energía será mejor en este tramo y también porque el comportamiento de VWC a

profundidad de 2cm y 5cm son muy variables por estar más próximos a la radiación durante el día y por ende el contenido de agua se evapora muy fácilmente.

En tanto al modelamiento y simulación, se resalta que el periodo establecido es de 19:00h a 06:00h del día siguiente, en las gráficas se mostradas en el capítulo 3.1 que corresponde a la presentación de mediciones, se muestra adicionalmente el periodo de 06:00 h - 07:00h para observar el comportamiento de las variables como la radiación de onda corta y como esta influye en las otras variables, ya que en ese horario hay presencia de radiación solar que viene a ser el factor más importante de calentamiento de la superficie de la tierra.

A partir de las mediciones se calcularon los incrementos de contenido volumétrico de agua en el suelo entre el horario de hora de aplicación de la técnica del riego pasivo y las 19:00 h que es el horario de inicio del modelo elaborado. Los resultados son mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16

Incrementos de contenido volumétrico de agua en el suelo para las diferentes fechas de experimentación.

<i>Experimento</i>	Fecha	Altura de Agua, mm	Volumen de agua según área de parcela experimental, l	Incremento de Contenido volumétrico de agua en el suelo
1	05/06/2017	5	20	0.0121
2	13/06/2017	10	40	0.0143
3	20/06/2017	20	80	0.0228
4	10/07/2017	25	100	0.0247
5	19/07/2017	35	140	0.0255
6	05/09/2017	50	200	0.0261

Fuente: Elaboración propia

Para observar el comportamiento del incremento de humedad frente a diferentes alturas de agua que se aplicaron en la técnica del riego, se realizó la siguiente gráfica considerando un dato adicional, el cual viene a ser cuando no se aplica la técnica del riego pasivo, el incremento de contenido volumétrico de agua en el suelo es cero.

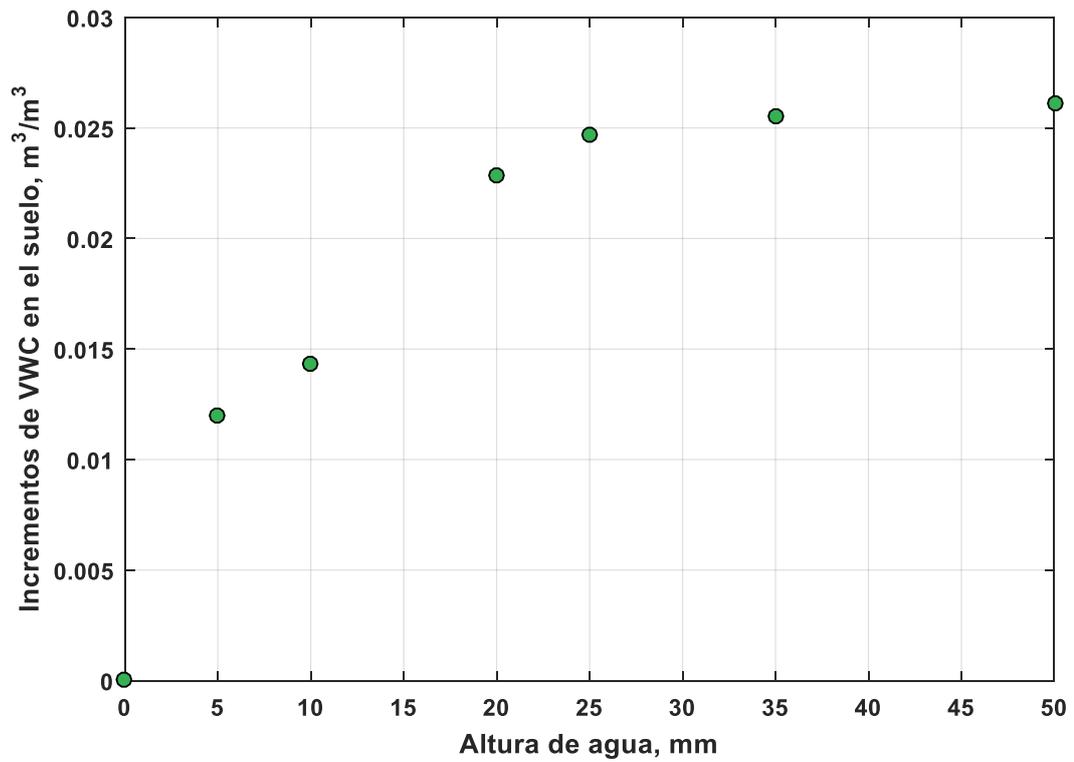


Figura 31. Comportamiento gráfico de los incrementos del contenido volumétrico de agua (VWC) en el suelo frente a diferentes alturas de agua usadas.

Fuente: Elaboración Propia

De la Figura 31 se puede observar que el incremento de humedad tiene un comportamiento polinómico. Para realizar un mejor análisis se realizó una regresión polinómica a la figura anterior. El ajuste se realizó en MATLAB la cual es mostrada en siguiente figura.

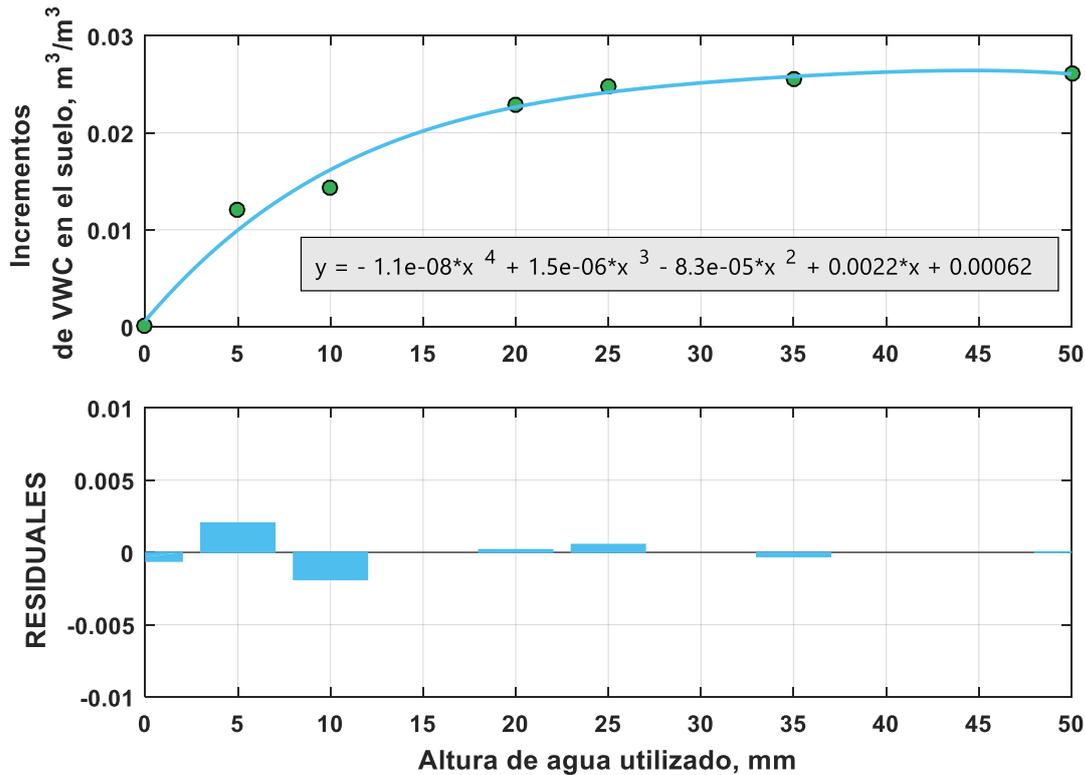


Figura 32. Regresión polinómica de 4to orden aplicada a los incrementos de contenido volumétrico de agua (WVC) en el suelo con diferentes alturas de agua.

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se observa un ajuste de cuarto orden y los residuales que se genera entre los datos de incremento de humedad con el ajuste polinómico. Se puede observar que los residuales más altos son el de 5 y 10 mm.

Los incrementos de Humedad son aplicados al modelo elaborado para observar el comportamiento de la temperatura mínima frente a los aumentos de humedad en el suelo. Se aplicó para un día típico de helada, del año 2016 por 3 motivos:

- Al realizar experimentos el presente año, las condiciones pueden hacer variar las propiedades físicas y térmicas del suelo, arrojando resultados distorsionados del contexto actual.
- Porque es un día típico de helada, de mediana intensidad, ubicada en el mes en el que más frecuencia de heladas se reportaron en el 2016, en el mes de julio.
- Los datos de validación demuestran que para este día en específico tiene un mejor comportamiento entre datos simulados y observados.

Al contenido volumétrico de agua en el suelo se aplicaron los incrementos de la medidos y expresados en la Tabla 16, e insertando de igual forma las condiciones iniciales de perfil

de temperatura del suelo, el comportamiento de la radiación de onda larga de entrada al sistema, velocidad del viento y temperatura ambiente.

En la siguiente gráfica se muestra las simulaciones de los comportamientos con los diferentes incrementos de contenido de agua volumétrico del suelo,

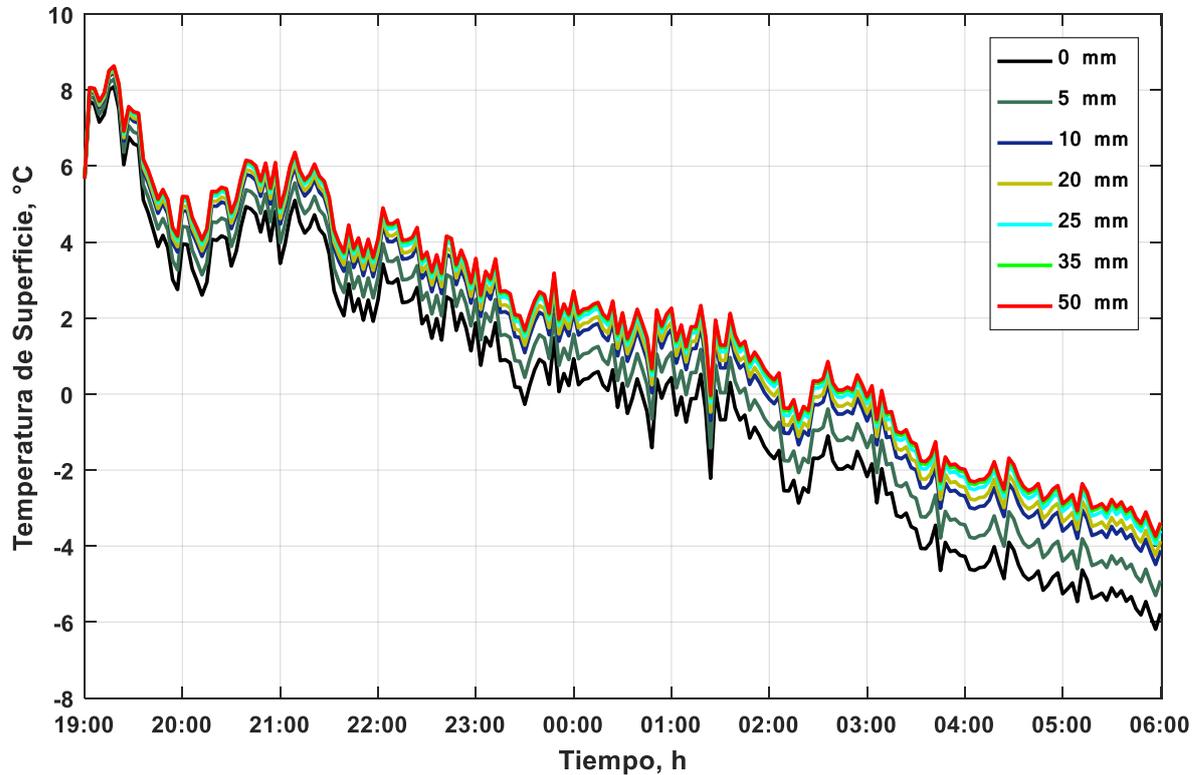


Figura 33. Diferentes comportamientos de la temperatura de superficie a distintos valores de altura de agua usados en la técnica del riego pasivo, usando el modelo elaborado.

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 33 se muestra los comportamientos de la temperatura de superficie utilizando el modelo elaborado. Los valores de altura de aguas utilizadas varían desde una aplicación de 0 mm de altura de agua hasta los 50 mm. La temperatura de superficie aumenta en función al incremento del contenido volumétrico de agua en el suelo, por lo que tiene una relación directa como se muestra en la figura. La variación es desde un mínimo de -6.18 hasta -3.73 °C. El aumento de la temperatura de superficie se grafica en la siguiente figura.

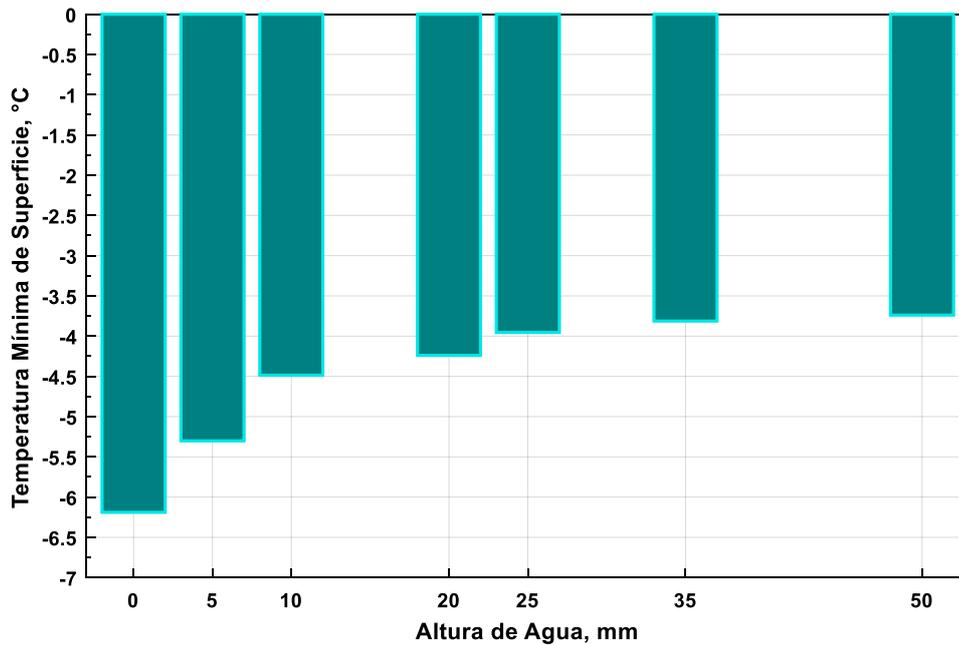


Figura 34. Comportamiento de la temperatura mínima de superficie a diferentes valores de la altura de agua usados en la técnica del riego pasivo, utilizando el modelo elaborado.

Fuente: Elaboración propia

De la Figura 34 se observa un máximo incremento de 2.45 °C que se da entre los 0 y los 50 mm de altura de agua, en los primeros valores se observa un rápido incremento de la temperatura de superficie hasta los 10 mm con un valor de 1.70 °C, posteriormente un incremento mediano entre los 10 mm y 25 mm de altura de agua cuyo valor de 0.53°C y por último un leve incremento entre 25 mm a 50 mm de altura de agua con un incremento de 0.21°C.

Un óptimo de la técnica del riego pasivo se considera utilizando 25 mm de altura de agua, porque el incremento posterior de la temperatura de superficie no es significativo por el motivo de no compensar el volumen de agua extra que debe usarse para el poco incremento de la temperatura de superficie. Si consideramos una parcela de 1 Hectárea (10000 m²), el óptimo sería usar 250 m³ (25 mm) para poder elevar la temperatura de superficie en 2.23°C ya que con 50 mm de altura de agua se tendrían que usar 500 m³ para elevar 2.45°C observando un incremento entre estos 2 valores tan solo de 0.22°C.

3.4. Proceso de la prueba de hipótesis

Para determinar el efecto que tiene el modelamiento y simulación en la estimación de la temperatura de superficie observada para el periodo descrito, se utilizó la prueba Z para 2 mediciones independientes: Medición directa y estimación de la temperatura de

superficie mediante el modelo matemático propuesto, con un intervalo de confianza de 95%.

La hipótesis planteada para la investigación es:

H_0 = La temperatura de superficie determinada a través del método experimental (Medición directa) es igual a la temperatura de superficie estimada por el modelo matemático propuesto.

H_1 = La temperatura de superficie determinada a través del método experimental (Medición directa) es mayor a la temperatura de superficie estimada por el modelo matemático propuesto.

Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 17

Pruebas de normalidad respecto al modelo matemático

Pruebas de normalidad

TIPO		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
TEMP	OBSERVAD	,104	660	,001	,942	660	,000
	SIMULADO	,086	660	,018	,968	660	,003

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Interpretación: Puesto la significación asintótica es menor a 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula, por lo cual se concluye que la variable analizada no sigue la distribución normal.

Tabla 18

Prueba de homogeneidad de varianza respecto al modelo matemático

Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
TEMP	Basándose en la media	,209	1	262	,648
	Basándose en la mediana.	,194	1	262	,660
	Basándose en la mediana y con gl corregido	,194	1	257,906	,660
	Basándose en la media recortada	,190	1	262	,663

Interpretación: Puesto la significación asintótica es pequeña (Menor a 0.05), podemos rechazar la hipótesis nula, por lo cual se concluye que la variable analizada tienen homogeneidad de varianzas.

Tabla 19

Prueba de muestras independientes respecto al modelo matemático

Prueba de muestras independientes

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
									Inferior	Superior
TEMP	Se han asumido varianzas iguales	,209	,648	-2,286	262	,523	-1,02478324	,44838181	-1,90767380	-,14189267
	No se han asumido varianzas iguales			-2,286	261,963	,523	-1,02478324	,44838181	-1,90767438	-,14189209

Interpretación: Puesto la significación asintótica es mayor que 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula, por lo cual se concluye que las estimaciones del modelo matemático propuesto es mejor que el método experimental.

3.5. Discusión de resultados

El modelo matemático elaborado y validado en la presente investigación, cuenta con parámetros de entrada que fueron estudiadas en otras investigaciones tales como emisividad, albedo, etc. y estos parámetros varían según el valor de VWC por otra parte el modelo elaborado por Saavedra (2010) da una buena aproximación del comportamiento de la temperatura de superficie para un horario nocturno, pero cuenta con parámetros fijos como emisividad y albedo que hacen que el comportamiento de la temperatura de superficie sea lineal. Otro punto importante es la inserción del mecanismo de transferencia de energía por convección, lo cual hace que el comportamiento de la temperatura de superficie sea aún más próximo con el comportamiento observado con medición directa. Todo esto se refleja en los estadísticos de validación, los cuales son más óptimos en el modelo elaborado en la esta investigación que el modelo elaborado por Saavedra (2010).

El VWC juega un rol importante en el balance energético y por ende en la temperatura de superficie, Galdós (2017) en su investigación realizó un análisis para determinar el valor de VWC que se ajuste mejor entre la temperatura de superficie obtenida con el modelo de Saavedra (2010) frente a los datos observados. Llegó a la conclusión que un valor de 10% presenta mejor ajuste; para el caso de nuestra investigación se realizó un análisis experimental según el tipo de suelo de la parcela experimental que pertenece al IGP, este análisis mostró que para una buena aproximación de la temperatura de superficie entre datos observados y salida del modelo el valor de VWC debería de ser 21.3% que se mide a 10 cm bajo superficie.

De todo el proceso de investigación se consiguió un modelo validado que estima con buena aproximación el comportamiento de la temperatura de superficie, un análisis adicional con el modelo muestra que de haber aplicado la altura óptima de agua en la

técnica del riego pasivo para las fechas de heladas del año 2016 mostradas en la Figura 28, se pudieron haber mitigado los efectos de las heladas específicamente en el mes de junio 10 de los 19 fenómenos de heladas registradas, que viene a ser un 53%, en el mes de julio se pudieron mitigar los efectos para 5 de los 23 fenómenos de heladas registradas que representan un 23% y finalmente para el mes de agosto se pudieron mitigar los efectos para 12 de los 14 efectos de los fenómenos de heladas que representan un 86%.

CONCLUSIONES.

1. A través del modelo matemático elaborado y su posterior simulación se determinó que la altura de agua óptima que se debe aplicar a la técnica del riego pasivo es de 25 mm lo que permite un incremento de 2.23°C en la temperatura mínima de superficie.
2. A través del balance energético realizado en la superficie de un suelo desnudo de textura franco arcillosa arenosa, se elaboró un modelo matemático que describe la temperatura de superficie para un horario determinado que seguidamente fue validado utilizando los parámetros CD, C, MEF y r de Pearson para el periodo de más frecuencia de heladas en el año 2016.
3. A través de la literatura y análisis con el modelo elaborado, se determinó que a una profundidad de 10 cm el contenido volumétrico de agua en el suelo muestra un mejor comportamiento entre datos observados y simulados.
4. Con la experimentación realizada en el contexto de la investigación se determinó el comportamiento que existe entre el contenido volumétrico de agua en el suelo y la altura de agua aplicada:

<i>Altura de Agua, mm</i>	5	10	20	25	35	50
<i>Incremento de VWC, m³/m³</i>	0.0121	0.0143	0.0228	0.0247	0.0255	0.0261

El cual posee un mejor ajuste con un polinomio de 4to grado:

$$\Delta VWC = -1.1e^{-8} * h^4 + 1.5 * e^{-6} * h^3 - 8.3e^{-5}h^2 + 2.2e^{-3} + 6.2e^{-4}$$

Donde h es la altura de agua aplicada en la técnica del riego pasivo y ΔVWC es el incremento del contenido volumétrico de agua en el suelo.

RECOMENDACIONES.

- Realizar un modelamiento del proceso físico teniendo en cuenta el perfil de contenido volumétrico de agua en el suelo y evaluar su comportamiento con respecto al modelo elaborado en la presente investigación.
- Incorporar términos matemáticos par inferir valores tanto de radiación de onda larga, temperatura ambiente, velocidad de viento en la medida que sea posible para poder elaborar un nuevo modelo que pueda funcionar de forma predictiva con el fin de obtener el comportamiento de la temperatura de superficie y predecir la temperatura mínima para poder realizar con anticipación el uso de las técnicas de protección contra los efectos de las heladas.
- Realizar una investigación utilizando sembríos propios del Valle de Mantaro con el objetivo de determinar la eficiencia que tiene el modelo para describir la temperatura de superficie con la presencia de sembríos como la papa, maíz, etc. De no ser eficiente el modelo se puede añadir las variables propias de los sembríos para poder mejorar la eficiencia del modelo y determinar una “temperatura de cultivo” que pueda ser un indicador más eficiente para determinar el grado de los efectos de las heladas.
- Investigar el efecto de los abonos clásicos que son usados en el Valle del Mantaro en las propiedades físicas propias del tipo de suelo más relevante en el Valle del Mantaro utilizando el modelo elaborado en la presente investigación.
- El modelo se puede mejorar y elaborarse en 2 dimensiones cuyo fin sería elaborar un mapa de riesgo de efecto de heladas que sería muy útil para las municipalidades distritales y provinciales para la prevención de los efectos del fenómeno de las heladas.
- Al ser válido el modelo, se puede aplicar al estudio de otras técnicas de protección contra los efectos de las heladas que poseen alguna variación en los parámetros de entrada en el modelo elaborado y de igual forma poder optimizarlo utilizando la simulación en MATLAB.

BIBLIOGRAFÍA

- Abshaev, A., & Malkarov, K. (2009). Optimization of Parameters of an Artificial Aerosol Layer for Radiation Frost Protection. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 34(9), 27-39.
- Alonso, P. (21 de Marzo de 2014). *FOTOINTERPRETACION Y TELEDETECCION*. Obtenido de <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/>
- Caramori, P., & Filho, A. (1996). *Coffee shade with Mimosa scabrella Benth for frost*. Londrina: Kluwer Academic Publishers.
- Castro, R., & Morejón, R. (2013). Efecto de borde y la validez de los muestreos en el cultivo del arroz. *Cultivos Tropicales*, 70-75.
- Çengel, Y. (2011). *Transferencia de calor y masa*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Coakley, J. (2003). Reflectance and albedo, surface. *Elsevier Science*, 1914-1923.
- Cunha, J. M. (1952). *Contribuição para o estudo do problema das geadas em*. Lisboa: I.S.A.
- De Fina, A. (1945). *Los Elementos Climáticos y los Cultivos*. Buenos Aires: Editorial Sudamericana.
- Duman, J., & Wisniewski, M. (2013). The Use of Antifreeze Proteins for Frost Protection in Sensitive Crop Plants. *ELSEVIER*, 116-121.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO. (2010). *Protección contra heladas: Fundamentos, práctica y economía*. Roma: FAO. Recuperado el 20 de 07 de 2017, de <http://www.fao.org/home/en/>
- Galdos, A. (2017). *Variación estacional de la radiación infrarroja, humedad del suelo y su efecto sobre la temperatura mínima superficial en el Observatorio de Huancayo, Junín-Perú*. Lima: Universidad Nacional de San Marcos.
- Garay, O., & Ochoa, A. (2010). *Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelo agrícola en el Valle del Mantaro*. Lima: IGP.
- Geiger, R. (1995). *The climate near the ground*. Michigan: Friedr. Vieweg.
- Ghaemi, A., & Rafie, M. (2009). Tree-Temperature Monitoring for Frost Protection of Orchards in Semi-Arid. *Agricultural Sciences in China*, 98-107.
- Gonzales, A., & Hill, R. (1997). PASTMOD, un modelo para simular la temperatura de suelo, crecimiento de pastos y balance de agua. *Tec. Pecu*, 57-65.
- Guevara, P. (2016). *Análisis y simulación de Procesos*. Huancayo: UNCP.

- Hamer, P. (1989). *Simulation of the effects of environmental variables on the water requirements for frost protection by overhead sprinkler irrigation*. UK: Horticultural Engineering Division.
- Hasfurther, V., & Burman, R. (1973). Soil temperature modeling using air temperature as a driving mechanism. *ASAE*, 78-81.
- Hernandez, G. (2011). *Tipos de modelos en investigación de operaciones*. Ciudad de Mexico: Universidad Autónoma de Hidalgo.
- Hewett, E. (1971). Preventing frost damage to fruit trees. *Information Series*, 55.
- Himmelblau, D., & Bischoff, K. (2004). *Análisis y simulación de procesos*. Texas: Reverté S.A.
- Hogg, W. (1950). Frequency of radiation and wind frosts during spring in Kent. *Meteorological Magazine*, 42-49.
- Idso, S., Aase, J., & Jackson, R. (1975). Net radiation-Soil heat flux relations as influenced by soil water content variations. *Boundary- Layer Meteorology*, 113-122.
- Idso, S., Jackson, R., & Reginato, R. (1975). The Dependence of Bare Soil Albedo on Soil Water Content. *Agricultura! Research Service*, 109-113.
- Incropera, F. (2011). *Intriduction to heat transfer*. United States of America: John Wiley & Sons Inc.
- Islas, S. (2014). *Modelos de simulación de sistemas*. Sonora: Universidad de Sonora.
- Kalma, J., Laughlin, G., & Caprio, J. (1992). Advances in bioclimatology. *Bioclimatology frost*, 144.
- Kareem, M., & Al-Nimr, M. (2008). Smoke modified environment for crop frost protection: a fuzzy logic approach. *ELSEVIER*, 104-110.
- Lawrence, E. (1952). Frsot investigation. *Meteorological Magazine*, 65-74.
- Lhome, J.-P. (2003). *Mitigación de heladas en los camellones del altiplano*. Peru: Bulletin de l'Institut français d'études andines.
- Luo, Y., Loomis, R., & Hsiao, T. (24 de 09 de 1992). Simulation of soil temperature crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 61, 23-38.
- Medina, S., Vargas, L., Navarro, J., Canul, C., & Peraza, S. (2010). Comparación de medidas de desviación para validar modelos sin sesgo, sesgo constante o proporcional. *Redalyc*, 255-263.
- Norton, J. (2008). Sprinkler frost protection,parts I-III. *Irrigation Management BMP*, 6(14), 6-14.

- Pereyra, A. (2002). Agrometeorología: fundamentos e aplicações práticas. En A. Pereyra, *Agrometeorología: fundamentos e aplicações práticas* (pág. 478). Guaíba: Editorial Agropecuaria.
- Pingping, L., Wenye, W., & Yongguang, H. (2015). Optimal design of wind machine impeller for frost protection based on CFD and its field test on airflow disturbance. *Int J Agric & Biol Eng*, 8(5), 43-49.
- Porteous, A. (1992). Dictionary of environmental science and technology. *John Wiley and Sons*, 439.
- Prada, C. (2007). *Validación de modelos*. Valladolid: UVA.
- Raposo, J. (1967). A defesa das plantas contra as geadas. *Junta de Colonização*, 111.
- Saavedra, M. (2010). *Caracterización física de heladas radiativas en el Valle del Mantaro*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Sartori, E. (2006). *Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces*. Paraíba: ELSEVIER.
- Scena, N. (1999). *Modelado, simulación y optimización de procesos químicos*. Colombia: UNT.
- SENAMHI-FAO. (2010). *Atlas de heladas del Perú*. Lima: SENAMHI.
- Snyder, R. (noviembre de 2000). *Importancia de la protección contra heladas*. Obtenido de <http://biomet.ucdavis.edu/frostprotection/Principles%20of%20Frost%20Protection/FP005.html>
- Snyder, R., Paw U, K., & Thompson, J. (1987). Passive frost protection of trees and vines. *DANR*, 21-29.
- Teitel, M., & Peiper, U. (1996). Shading screens for frost protection. *Elsevier*, 273-286.
- Trasmonte, G., & Enciso, L. (2012). Antecedentes generales sobre heladas en el Valle del Mantaro. *Eventos meteorológicos extremos en el Valle del Mantaro*, 94-99.
- Ventskevich, G. (1958). *Agrometeorology*. Jerusalem: Israel Programme for scientific translation.
- Villalobos, F. (2009). *Fitotecnia-Bases y tecnología para la producción agrícola*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Volkheimer, W. (30 de enero de 2005). *crycit*. Obtenido de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Albedo.htm>
- White, R., & Hass, J. (1975). Assessment of Research on Natural Hazards. *The MIT Press*, 487.

- Wullschleger, J., Cahoon, J., Ferguson, J., & Oosterhuis, D. (14 de Mayo de 1991). SURFTEMP: Simulation of soil surface temperature using the energy balance equation. *J. Agron. Educ.*, 20(1), 11-15.
- Zavala, J., & Salgado, S. (2013). Transecto de suelos terrazas con plantaciones de cítricos en Tabasco. *Ecosistemas y recursos agropecuarios.*, 123-137.

ANEXOS.

ANEXO A: FOTOGRAFÍAS



Fotografía 1.- Parcela Experimental ubicado en el Observatorio del Huayao-IGP



Fotografía 2. Límites de parcela experimental



Fotografía 3. Estación meteorológica experimental.



Fotografía 4. Ubicación de sensores de radiación- Piranómetros



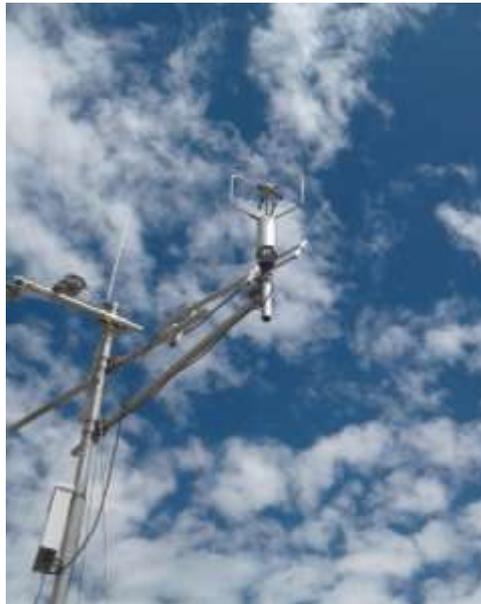
Fotografía 5. Pirgeómetro que observa la radiación incidente.



Fotografía 6. Piranómetro que observa la radiación incidente.



Fotografía 7. Piranómetro que observa la radiación reflejada.



Fotografía 8. Anemómetro sónico.



**Fotografía 9. Ubicación de sensores de radiación de onda larga, de entrada y salida-
Pirgeómetros.**



Fotografía 10. Sensores de temperatura y humedad relativa del aire.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1817-06-01 00:00:00	02481	-1.251311, 0.00100978, 0.0212170, 0.00130317, -0.00107044, -0.0000174203, -0.00181142, 0.141811, -0.00170086, 0.00141818, 0.100100, 0.00120042, 0.0732014, 0.0140201, 0.00107086, 0.111700, -0.112100, -0.112100, -0.112100, 0.00100978, 0.00120042, 0.00141818, 0.00161878, 0.00181938, 0.00201998, 0.00222058, 0.00242118, 0.00262178, 0.00282238, 0.00302298, 0.00322358, 0.00342418, 0.00362478, 0.00382538, 0.00402598, 0.00422658, 0.00442718, 0.00462778, 0.00482838, 0.00502898, 0.00522958, 0.00543018, 0.00563078, 0.00583138, 0.00603198, 0.00623258, 0.00643318, 0.00663378, 0.00683438, 0.00703498, 0.00723558, 0.00743618, 0.00763678, 0.00783738, 0.00803798, 0.00823858, 0.00843918, 0.00863978, 0.00884038, 0.00904098, 0.00924158, 0.00944218, 0.00964278, 0.00984338, 0.01004398, 0.01024458, 0.01044518, 0.01064578, 0.01084638, 0.01104698, 0.01124758, 0.01144818, 0.01164878, 0.01184938, 0.01204998, 0.01225058, 0.01245118, 0.01265178, 0.01285238, 0.01305298, 0.01325358, 0.01345418, 0.01365478, 0.01385538, 0.01405598, 0.01425658, 0.01445718, 0.01465778, 0.01485838, 0.01505898, 0.01525958, 0.01546018, 0.01566078, 0.01586138, 0.01606198, 0.01626258, 0.01646318, 0.01666378, 0.01686438, 0.01706498, 0.01726558, 0.01746618, 0.01766678, 0.01786738, 0.01806798, 0.01826858, 0.01846918, 0.01866978, 0.01887038, 0.01907098, 0.01927158, 0.01947218, 0.01967278, 0.01987338, 0.02007398, 0.02027458, 0.02047518, 0.02067578, 0.02087638, 0.02107698, 0.02127758, 0.02147818, 0.02167878, 0.02187938, 0.02207998, 0.02228058, 0.02248118, 0.02268178, 0.02288238, 0.02308298, 0.02328358, 0.02348418, 0.02368478, 0.02388538, 0.02408598, 0.02428658, 0.02448718, 0.02468778, 0.02488838, 0.02508898, 0.02528958, 0.02549018, 0.02569078, 0.02589138, 0.02609198, 0.02629258, 0.02649318, 0.02669378, 0.02689438, 0.02709498, 0.02729558, 0.02749618, 0.02769678, 0.02789738, 0.02809798, 0.02829858, 0.02849918, 0.02869978, 0.02890038, 0.02910098, 0.02930158, 0.02950218, 0.02970278, 0.02990338, 0.03010398, 0.03030458, 0.03050518, 0.03070578, 0.03090638, 0.03110698, 0.03130758, 0.03150818, 0.03170878, 0.03190938, 0.03210998, 0.03231058, 0.03251118, 0.03271178, 0.03291238, 0.03311298, 0.03331358, 0.03351418, 0.03371478, 0.03391538, 0.03411598, 0.03431658, 0.03451718, 0.03471778, 0.03491838, 0.03511898, 0.03531958, 0.03552018, 0.03572078, 0.03592138, 0.03612198, 0.03632258, 0.03652318, 0.03672378, 0.03692438, 0.03712498, 0.03732558, 0.03752618, 0.03772678, 0.03792738, 0.03812798, 0.03832858, 0.03852918, 0.03872978, 0.03893038, 0.03913098, 0.03933158, 0.03953218, 0.03973278, 0.03993338, 0.04013398, 0.04033458, 0.04053518, 0.04073578, 0.04093638, 0.04113698, 0.04133758, 0.04153818, 0.04173878, 0.04193938, 0.04213998, 0.04234058, 0.04254118, 0.04274178, 0.04294238, 0.04314298, 0.04334358, 0.04354418, 0.04374478, 0.04394538, 0.04414598, 0.04434658, 0.04454718, 0.04474778, 0.04494838, 0.04514898, 0.04534958, 0.04555018, 0.04575078, 0.04595138, 0.04615198, 0.04635258, 0.04655318, 0.04675378, 0.04695438, 0.04715498, 0.04735558, 0.04755618, 0.04775678, 0.04795738, 0.04815798, 0.04835858, 0.04855918, 0.04875978, 0.04896038, 0.04916098, 0.04936158, 0.04956218, 0.04976278, 0.04996338, 0.05016398, 0.05036458, 0.05056518, 0.05076578, 0.05096638, 0.05116698, 0.05136758, 0.05156818, 0.05176878, 0.05196938, 0.05216998, 0.05237058, 0.05257118, 0.05277178, 0.05297238, 0.05317298, 0.05337358, 0.05357418, 0.05377478, 0.05397538, 0.05417598, 0.05437658, 0.05457718, 0.05477778, 0.05497838, 0.05517898, 0.05537958, 0.05558018, 0.05578078, 0.05598138, 0.05618198, 0.05638258, 0.05658318, 0.05678378, 0.05698438, 0.05718498, 0.05738558, 0.05758618, 0.05778678, 0.05798738, 0.05818798, 0.05838858, 0.05858918, 0.05878978, 0.05899038, 0.05919098, 0.05939158, 0.05959218, 0.05979278, 0.05999338, 0.06019398, 0.06039458, 0.06059518, 0.06079578, 0.06099638, 0.06119698, 0.06139758, 0.06159818, 0.06179878, 0.06199938, 0.06219998, 0.06240058, 0.06260118, 0.06280178, 0.06300238, 0.06320298, 0.06340358, 0.06360418, 0.06380478, 0.06400538, 0.06420598, 0.06440658, 0.06460718, 0.06480778, 0.06500838, 0.06520898, 0.06540958, 0.06561018, 0.06581078, 0.06601138, 0.06621198, 0.06641258, 0.06661318, 0.06681378, 0.06701438, 0.06721498, 0.06741558, 0.06761618, 0.06781678, 0.06801738, 0.06821798, 0.06841858, 0.06861918, 0.06881978, 0.06902038, 0.06922098, 0.06942158, 0.06962218, 0.06982278, 0.07002338, 0.07022398, 0.07042458, 0.07062518, 0.07082578, 0.07102638, 0.07122698, 0.07142758, 0.07162818, 0.07182878, 0.07202938, 0.07222998, 0.07243058, 0.07263118, 0.07283178, 0.07303238, 0.07323298, 0.07343358, 0.07363418, 0.07383478, 0.07403538, 0.07423598, 0.07443658, 0.07463718, 0.07483778, 0.07503838, 0.07523898, 0.07543958, 0.07564018, 0.07584078, 0.07604138, 0.07624198, 0.07644258, 0.07664318, 0.07684378, 0.07704438, 0.07724498, 0.07744558, 0.07764618, 0.07784678, 0.07804738, 0.07824798, 0.07844858, 0.07864918, 0.07884978, 0.07905038, 0.07925098, 0.07945158, 0.07965218, 0.07985278, 0.08005338, 0.08025398, 0.08045458, 0.08065518, 0.08085578, 0.08105638, 0.08125698, 0.08145758, 0.08165818, 0.08185878, 0.08205938, 0.08225998, 0.08246058, 0.08266118, 0.08286178, 0.08306238, 0.08326298, 0.08346358, 0.08366418, 0.08386478, 0.08406538, 0.08426598, 0.08446658, 0.08466718, 0.08486778, 0.08506838, 0.08526898, 0.08546958, 0.08567018, 0.08587078, 0.08607138, 0.08627198, 0.08647258, 0.08667318, 0.08687378, 0.08707438, 0.08727498, 0.08747558, 0.08767618, 0.08787678, 0.08807738, 0.08827798, 0.08847858, 0.08867918, 0.08887978, 0.08908038, 0.08928098, 0.08948158, 0.08968218, 0.08988278, 0.09008338, 0.09028398, 0.09048458, 0.09068518, 0.09088578, 0.09108638, 0.09128698, 0.09148758, 0.09168818, 0.09188878, 0.09208938, 0.09228998, 0.09249058, 0.09269118, 0.09289178, 0.09309238, 0.09329298, 0.09349358, 0.09369418, 0.09389478, 0.09409538, 0.09429598, 0.09449658, 0.09469718, 0.09489778, 0.09509838, 0.09529898, 0.09549958, 0.09569958, 0.09590018, 0.09610078, 0.09630138, 0.09650198, 0.09670258, 0.09690318, 0.09710378, 0.09730438, 0.09750498, 0.09770558, 0.09790618, 0.09810678, 0.09830738, 0.09850798, 0.09870858, 0.09890918, 0.09910978, 0.09931038, 0.09951098, 0.09971158, 0.09991218, 1.00011278, 1.00031338, 1.00051398, 1.00071458, 1.00091518, 1.00111578, 1.00131638, 1.00151698, 1.00171758, 1.00191818, 1.00211878, 1.00231938, 1.00251998, 1.00272058, 1.00292118, 1.00312178, 1.00332238, 1.00352298, 1.00372358, 1.00392418, 1.00412478, 1.00432538, 1.00452598, 1.00472658, 1.00492718, 1.00512778, 1.00532838, 1.00552898, 1.00572958, 1.00593018, 1.00613078, 1.00633138, 1.00653198, 1.00673258, 1.00693318, 1.00713378, 1.00733438, 1.00753498, 1.00773558, 1.00793618, 1.00813678, 1.00833738, 1.00853798, 1.00873858, 1.00893918, 1.00913978, 1.00934038, 1.00954098, 1.00974158, 1.00994218, 1.01014278, 1.01034338, 1.01054398, 1.01074458, 1.01094518, 1.01114578, 1.01134638, 1.01154698, 1.01174758, 1.01194818, 1.01214878, 1.01234938, 1.01254998, 1.01275058, 1.01295118, 1.01315178, 1.01335238, 1.01355298, 1.01375358, 1.01395418, 1.01415478, 1.01435538, 1.01455598, 1.01475658, 1.01495718, 1.01515778, 1.01535838, 1.01555898, 1.01575958, 1.01596018, 1.01616078, 1.01636138, 1.01656198, 1.01676258, 1.01696318, 1.01716378, 1.01736438, 1.01756498, 1.01776558, 1.01796618, 1.01816678, 1.01836738, 1.01856798, 1.01876858, 1.01896918, 1.01916978, 1.01937038, 1.01957098, 1.01977158, 1.01997218, 1.02017278, 1.02037338, 1.02057398, 1.02077458, 1.02097518, 1.02117578, 1.02137638, 1.02157698, 1.02177758, 1.02197818, 1.02217878, 1.02237938, 1.02257998, 1.02278058, 1.02298118, 1.02318178, 1.02338238, 1.02358298, 1.02378358, 1.02398418, 1.02418478, 1.02438538, 1.02458598, 1.02478658, 1.02498718, 1.02518778, 1.02538838, 1.02558898, 1.02578958, 1.02599018, 1.02619078, 1.02639138, 1.02659198, 1.02679258, 1.02699318, 1.02719378, 1.02739438, 1.02759498, 1.02779558, 1.02799618, 1.02819678, 1.02839738, 1.02859798, 1.02879858, 1.02899918, 1.02919978, 1.02939938, 1.02959998, 1.02979958, 1.02999918, 1.03019978, 1.03039938, 1.03059998, 1.03079958, 1.03099918, 1.03119978, 1.03139938, 1.03159998, 1.03179958, 1.03199918, 1.03219978, 1.03239938, 1.03259998, 1.03279958, 1.03299918, 1.03319978, 1.03339938, 1.03359998, 1.03379958, 1.03399918, 1.03419978, 1.03439938, 1.03459998, 1.03479958, 1.03499918, 1.03519978, 1.03539938, 1.03559998, 1.03579958, 1.03599918, 1.03619978, 1.03639938, 1.03659998, 1.03679958, 1.03699918, 1.03719978, 1.03739938, 1.03759998, 1.03779958, 1.03799918, 1.03819978, 1.03839938, 1.03859998, 1.03879958, 1.03899918, 1.03919978, 1.03939938, 1.03959998, 1.03979958, 1.03999918, 1.04019978, 1.04039938, 1.04059998, 1.04079958, 1.04099918, 1.04119978, 1.04139938, 1.04159998, 1.04179958, 1.04199918, 1.04219978, 1.04239938, 1.04259998, 1.04279958, 1.04299918, 1.04319978, 1.04339938, 1.04359998, 1.04379958, 1.04399918, 1.04419978, 1.04439938, 1.04459998, 1.04479958, 1.04499918, 1.04519978, 1.04539938, 1.04559998, 1.04579958, 1.04599918, 1.04619978, 1.04639938, 1.04659998, 1.04679958, 1.04699918, 1.04719978, 1.04739938, 1.04759998, 1.04779958, 1.04799918, 1.04819978, 1.04839938, 1.04859998, 1.04879958, 1.04899918, 1.04919978, 1.04939938, 1.04959998, 1.04979958, 1.04999918, 1.05019978, 1.05039938, 1.05059998, 1.05079958, 1.05099918, 1.05119978, 1.05139938, 1.05159998, 1.05179958, 1.05199918, 1.05219978, 1.05239938, 1.05259998, 1.05279958, 1.05299918, 1.05319978, 1.05339938, 1.05359998, 1.05379958, 1.05399918, 1.05419978, 1.05439938, 1.05459998, 1.05479958, 1.05499918, 1.05519978, 1.05539938, 1.05559998, 1.05579958, 1.05599918, 1.05619978, 1.05639938, 1.05659998, 1.05679958, 1.05699918, 1.05719978, 1.05739938, 1.05759998, 1.05779958, 1.05799918, 1.05819978, 1.05839938, 1.05859998, 1.05879958, 1.05899918, 1.05919978, 1.05939938, 1.05959998, 1.05979958, 1.05999918, 1.06019978, 1.06039938, 1.06059998, 1.06079958, 1.06099918, 1.06119978, 1.06139938, 1.06159998, 1.06179958, 1.06199918, 1.06219978, 1.06239938, 1.06259998, 1.06279958, 1.06299918, 1.06319978, 1.06339938, 1.06359998, 1.06379958, 1.06399918, 1.06419978, 1.06439938, 1.06459998, 1.06479958, 1.06499918, 1.06519978, 1.06539938, 1.06559998, 1.06579958, 1.06599918, 1.06619978, 1.06639938, 1.06659998, 1.06679958, 1.06699918, 1.06719978, 1.06739938, 1.06759998, 1.06779958, 1.06799918, 1.06819978, 1.06839938, 1.06859998, 1.06879958, 1.06899918, 1.06919978, 1.06939938, 1.06959998, 1.06979958, 1.06999918, 1.07019978, 1.07039938, 1.07059998, 1.07079958, 1.07099918, 1.07119978, 1.07139938, 1.07159998, 1.07179958, 1.07199918, 1.07219978, 1.07239938, 1.07259998, 1.07279958, 1.07299918, 1.07319978, 1.07339938, 1.07359998, 1.07379958, 1.07399918, 1.07419978, 1.07439938, 1.07459998, 1.07479958, 1.07499918, 1.07519978, 1.07539938, 1.07559998, 1.07579958, 1.07599918, 1.07619978, 1.07639938, 1.07659998, 1.07679958, 1.07699918, 1.07719978, 1.07739938, 1.07759998, 1.07779958, 1.07799918, 1.07819978, 1.07839938, 1.07859998, 1.07879958, 1.07899918, 1.07919978, 1.07939938, 1.07959998, 1.07979958, 1.07999918, 1.08019978, 1.08039938, 1.08059998, 1.08079958, 1.08099918, 1.08119978, 1.08139938, 1.08159998, 1.08179958, 1.08199918, 1.08219978, 1.08239938, 1.08259998, 1.08279958, 1.08299918, 1.08319978, 1.08339938, 1.08359998, 1.08379958, 1.08399918, 1.08419978, 1.08439938, 1.08459998, 1.08479958, 1.08499918, 1.08519978, 1.08539938, 1.08559998, 1.08579958, 1.08599918, 1.08619978, 1.08639938, 1.08659998, 1.08679958, 1.08699918, 1.08719978, 1.08739938, 1.08759998, 1.08779958, 1.08799918, 1.08819978, 1.08839938, 1.08859998, 1.08879958, 1.08899918, 1.08919978, 1.08939938, 1.08959998, 1.08979958, 1.08999918, 1.09019978, 1.09039938, 1.09059998, 1.09079958, 1.09099918, 1.09119978, 1.09139938, 1.09159998, 1.09179958, 1.09199918, 1.09219978, 1.09239938, 1.09259998, 1.09279958, 1.09299918, 1.09319978, 1.09339938, 1.09359998, 1.09379958, 1.09399918, 1.09419978, 1.09439938, 1.09459998, 1.09479958, 1.09499918, 1.09519978, 1.09539938, 1.09559998, 1.09579958, 1.09599918, 1.09619978, 1.09639938, 1.09659998, 1.09679958, 1.09699918, 1.09719978, 1.09739938, 1.09759998, 1.09779958, 1.09799918, 1.09819978, 1.09839938, 1.09859998, 1.09879958, 1.09899918, 1.09919978, 1.09939938, 1.09959998, 1.09979958, 1.09999918, 1.10019978, 1.10039938, 1.10059998, 1.10079958, 1.10099918, 1.10119978, 1.10139938, 1.10159998, 1.10179958, 1.1		